

Ramon Mendes Knabben

**DESENVOLVIMENTO DO TRAILER-CPX E DE UMA
MISTURA ASFÁLTICA DE BAIXA EMISSÃO DE RUÍDO
PNEU-PAVIMENTO**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês.
Coorientador: Prof. PhD Samir N.Y. Gerges.

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Knabben, Ramon Mendes

Desenvolvimento do trailer-CPX e de uma mistura asfáltica de baixa emissão de ruído pneu-pavimento / Ramon Mendes Knabben; orientador, Glicério Trichês; coorientador, Samir Nagi Yousri Gerges - SC, 2017.
372 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Ruído pneu-pavimento. 3. Trailer-CPX. 4. Mistura asfáltica. 5. Absorção sonora. I. Trichês, Glicério. II. Nagi Yousri Gerges, Samir. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Ramon Mendes Knabben

**DESENVOLVIMENTO DO TRAILER-CPX E DE UMA
MISTURA ASFÁLTICA DE BAIXA EMISSÃO DE RUÍDO
PNEU-PAVIMENTO**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis-SC, 06 de abril de 2017.

Prof. Dr. Glicério Trichês – ECV/UFSC
Coordenador do curso/Orientador

Prof. PhD. Samir N.Y.Gerges – EMC/UFSC
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Liedi Légi Bariani Bernucci – USP (videoconferência)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Prof.^a Dr^a. Laura Maria Goretti da Motta – UFRJ (videoconferência)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht – ECV/UFSM (videoconferência)
Universidade Federal de Santa Maria

Prof. PhD. Arcanjo Lenzi – EMC/UFSC
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª. Dr^a. Liseane Padilha Thives – ECV/UFSC
Universidade Federal de Santa Catarina

Esta tese é dedicada especialmente aos meus amados pais, Rogério (*in memoriam*) e Carla.

AGRADECIMENTOS

À Deus por toda a sua graça.

À minha família, em especial ao meu pai Rogério de Oliveira Knabben e a minha mãe Carla Maria Mendes Knabben, por todo o amor e incentivo, sem eles nada disso seria possível.

À minha irmã Mariana Mendes Knabben por todo o apoio e amor.

Ao meu orientador e amigo, professor Dr. Glicério Trichês, por todos os ensinamento e apoio durante essa caminhada.

Ao Professor Dr. Samir Gerges, pela amizade e por toda a sua ajuda durante a execução deste trabalho.

Aos meus amigos Dr. João Victor Staub de Melo e Dr. Joe Villena, por todo o incentivo e amizade durante o mestrado e doutorado.

Ao amigo Dr. Wim van Keulen pela sua prestatividade.

Ao professor Dr. Erasmo Felipe Vergara por todos os conselhos.

À todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFSC que de alguma forma colaboraram para meu crescimento profissional e pessoal.

Aos colegas dos Laboratórios de Pavimentação, Mecânica dos Solos e de Vibrações Acústicas (LVA), pelo suporte oferecido durante toda a pesquisa.

À todos os meus amigos, pela força e apoio nos momentos de dificuldade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado.

Muito Obrigado!

RESUMO

O ruído gerado pelo tráfego de veículos vem sendo prioridade nos estudos em diversos países desenvolvidos, pois se trata de um dos problemas ambientais mais relevantes, principalmente em zonas residenciais. Em muitos destes países, o ruído veicular é o primeiro critério de escolha do tipo de revestimento do pavimento. A geração e a propagação do ruído dos veículos são regidas por vários e diferentes mecanismos. O ruído gerado pela interação pneu-pavimento passa ser a fonte dominante quando o veículo trafega em velocidades acima de 50 km/h. No entanto, no futuro, em que os carros comuns serão substituídos por carros elétricos o ruído veicular será gerado principalmente pela interação pneu-pavimento para qualquer velocidade. Com isso, há que se buscar meios para a mitigação do ruído, seja através do desenvolvimento tecnológico dos pneus, ou principalmente, através do desenvolvimento dos revestimentos asfálticos de baixo ruído. Nesse trabalho foi desenvolvido um trailer com o objetivo de medir o ruído da interação pneu-pavimento em campo. O trailer é do modelo Trailer-CPX (*Close Proximity Method*), nome que se refere ao método normalizado de medição da interação pneu-pavimento. Foram realizadas as medições em campo utilizando o Trailer-CPX em diferentes tipos de revestimento de pavimento existentes. Ainda foi desenvolvida uma mistura asfáltica de elevada capacidade de absorção sonora com o objetivo de reduzir o ruído da interação pneu-pavimento, propiciando a geração de revestimentos de baixo ruído. Para tanto foi realizado a otimização da textura e da porosidade dessa mistura asfáltica avaliando-se o coeficiente de absorção sonora com o método normalizado que utiliza o tubo de impedância. Por fim, foram desenvolvidos modelos que possam prever o ruído gerado pela interação pneu-pavimento através das propriedades das misturas asfálticas e das características da superfície do revestimento. O Trailer-CPX foi construído e qualificado de acordo com norma ISO 11819-2 (2010) e todos os resultados das medições realizadas para a sua certificação foram atendidos. Os resultados dos ensaios com o Trailer mostraram que a macrotextura das misturas densas tem grande influência na geração do ruído pneu-pavimento. A camada porosa de atrito (CPA) foi a que apresentou menor índice de ruído (CPXI) quando comparada com os demais revestimentos estudados.

Palavras-chave: Ruído pneu-pavimento. Trailer-CPX. Mistura asfáltica. Absorção sonora.

ABSTRACT

The noise generated by the vehicle traffic is being priority in the studies in several developed countries, for it addresses one of the most relevant environmental problems, mainly in residential areas. In many of these countries, the vehicular noise is the first criteria of choice of the type of pavement surface. The generation and propagation of vehicle noise are governed by several and different mechanisms. The noise generated by the tire-pavement interaction comes to be the dominant source when the vehicle transits in speeds above 50 km/h. However, in a future, in which regular cars will be replaced by electric cars, the vehicular noise will be generated mainly by the tire-pavement interaction for any speed. With that, we have to seek means to the mitigation of this noise, either through the technological development of tires, or mainly, through the development of low noise asphaltic surface. In this study it was developed a trailer with the objective of measuring the tire-pavement interaction noise in the field. The trailer is of the Trailer-CPX (Close Proximity Method) model, name that refers to the measuring method of the tire-pavement interaction. The measurements in the field were performed using the Trailer-CPX in different types of existing pavement surface. Also in this study, it was developed an asphaltic mixture of high capacity of sound absorption with the objective of reducing the tire-pavement interaction noise, propitiating the generation of low noise coverings. In order to do that, it was carried out the optimization of the texture and the porosity of that asphaltic mixture evaluating the sound absorption coefficient with the normalized method that uses the impedance tube. Finally, it were developed methods that can predict the noise generated by the tire-pavement interaction through the properties of the asphaltic mixtures and of the characteristics of the surface. The Trailer-CPX was built and qualified in accordance with ISO 11819-2 (2010) and all the results of the measurements made for its certification were met. The results of the tests with the Trailer showed that the macrotexture of the dense mixtures has great influence in the generation of the tire-pavement noise. The porous asphalt was the one with the lowest noise index (CPXI) when compared to the other surface studied.

Keywords: Tire-pavement noise. Trailer-CPX. Asphaltic mixture. Sound absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Circuitos de compensação sonora A,B e C.....	38
Figura 2.2 - Curvas de igual sonoridade.....	39
Figura 2.3 - Frequência característica do som para uma velocidade de 30 e 130 km/h.....	40
Figura 2.4 - Decréscimo do nível de pressão sonora em função do decréscimo de volume de tráfego.....	42
Figura 2.5 - Efeito da distância no nível de pressão sonora a partir de uma fonte pontual.....	44
Figura 2.6 - Efeito da distância no nível de pressão sonora a partir de um fluxo de tráfego.	44
Figura 2.7 - Efeito da adição de fontes de ruído.....	45
Figura 2.8 - Velocidade de cruzamento quando o ruído pneu-pavimento é dominante.	47
Figura 2.9 - Esquema ilustrativo dos mecanismos mecânicos de impactos.	48
Figura 2.10 - Esquema ilustrativo dos mecanismos mecânicos de adesão.	49
Figura 2.11 - Esquema ilustrativo dos mecanismos de geração aerodinâmicos.	50
Figura 2.12 - Parâmetros para materiais porosos.	51
Figura 2.13 - Aparato de medição da resistividade ao fluxo.	52
Figura 2.14 - Tubo de impedância.....	54
Figura 2.15 - Influência da espessura no coeficiente de absorção sonora.	58
Figura 2.16 - Coeficiente de absorção sonora para revestimentos porosos com diferentes espessuras.	59
Figura 2.17 - Coeficientes de absorção sonora obtidos em corpos de prova de espessuras diferentes, da mistura tipo CPA (camada porosa de atrito).	59
Figura 2.18 - Influência dos diferentes parâmetros na curva de absorção sonora.	60
Figura 2.19 - Correlação entre o coeficiente de absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios da mistura.	61
Figura 2.20 - Correlação entre o coeficiente de absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios comunicantes da mistura.	61
Figura 2.21 - Influência da absorção sonora na redução do ruído pneu-pavimento.	62
Figura 2.22 - Aparato para medição do coeficiente de absorção sonora.	63

Figura 2.23 - Coeficiente de absorção sonora de diferentes amostras. .	63
Figura 2.24 - Medida do ruído pelo método estatístico de passagem (SPB).....	65
Figura 2.25 - Equipamento de ensaio do método CPX.	66
Figura 2.26 - Método da Passagem Controlada (CPB).	66
Figura 2.27 - (a) Método Coast-By (LÁO, 2004) / (b) Método do tambor.	66
Figura 2.28 - Equipamento de ensaio do método CPX.	67
Figura 2.29 - Pneus de referência do trailer CPX: (a) ASTM SRTT e (b) Avon AV4.	68
Figura 2.30 - Posicionamento dos microfones no Trailer-CPX.	71
Figura 2.31 - Nível de pressão sonora medido com o trailer CPX para diferentes misturas asfálticas.	72
Figura 2.32 - Nível de pressão sonora pelo método do CPX para diferentes misturas asfáltica com velocidade de referência de 80 km/h: AC = Mistura densa; PA = Mistura porosa; UTLAC = Camada fina porosa.....	73
Figura 2.33 - Espectro do nível de pressão sonora do ensaio do Trailer CPX.....	74
Figura 2.34 - Espectro do nível de pressão sonora do ensaio do Trailer CPX para duas velocidades de referência.	74
Figura 2.35 - Equipamento de drenabilidade.	79
Figura 2.36 - Influência dos intervalos de comprimento de onda da textura da superfície.	81
Figura 2.37 - Detalhe da superfície.	81
Figura 2.38 - Ilustração dos parâmetros da textura do pavimento que influencia o ruído pneu-pavimento.	82
Figura 2.39 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego na Beira-Mar.	84
Figura 2.40 - Pêndulo Britânico.	85
Figura 2.41 - Relação entre o VDR (resistência à derrapagem) e o ruído gerado pela interação pneu-pavimento.....	87
Figura 2.42 - Ilustração do cálculo do MPD.	88
Figura 2.43 - Perfilômetro a laser dinâmico do tipo PG-LA ² IC.....	88
Figura 2.44 - Ilustração do cálculo do MDP para um perfil do segmento.	89
Figura 2.45 - Perfilômetro a lase tipo LMI SLS 5000 Selcom.....	89
Figura 2.46 - MPD para diferentes amostras de misturas asfálticas.	90
Figura 2.47 - Espectro do NPS medido com o Trailer CPX para 50 km/h.	90
Figura 2.48 - Influência do MPD no CPXI.	91
Figura 2.49 - Relação entre MPD e MTD.....	92

Figura 2.50 - Relação entre MPD e MTD com 95% de confiança.....	92
Figura 2.51 - Curvas granulométricas de misturas asfálticas de baixo ruído.	93
Figura 2.52 - Faixas granulométricas para misturas asfálticas de baixo ruído na Austrália.	95
Figura 2.53 - Máximo ruído <i>Coast-by</i> para velocidade de 80 km/h em uma camada densa e poro-elástica.	97
Figura 2.54 - Nível de pressão sonora CPX em função das primeiras semanas de serviço de diferentes misturas asfálticas.	98
Figura 2.55 - Ruído pneu-pavimento para diferentes idades do revestimento do pavimento.	99
Figura 2.56 - Relação entre temperatura do pavimento e pressão sonora.	101
Figura 2.57 - Relação entre nível sonora e temperatura em função do espectro da frequência.	101
Figura 2.58 - Relação entre nível de pressão sonora e temperatura em função da velocidade.	102
Figura 2.59 - Influência da categoria do veículo na emissão de ruído.	103
Figura 2.60 - Influência da dureza do pneu no nível de pressão sonora CPX.	106
Figura 2.61 - Influência típica da velocidade, em uma escala de velocidade linear, para 4 tipos de pneus utilizando o método do tambor.	107
Figura 2.62 - Influência típica da velocidade, em uma escala de velocidade logarítmica, para 4 tipos de pneus utilizando o método do tambor.	107
Figura 2.63 - Nível de pressão sonora versus velocidade do veículo.	108
Figura 3.1 - Fluxograma do método da pesquisa	112
Figura 3.2 - Fluxograma da Etapa 1	113
Figura 3.3 - Fluxograma da Etapa 2	115
Figura 3.4 - Fluxograma da Etapa 3	117
Figura 3.5 - Curvas granulométricas das misturas de baixo ruído	118
Figura 3.6 - Esquema da caracterização dos materiais.	119
Figura 3.7 - Esquema da dosagem da mistura.	120
Figura 3.8 - Esquema dos ensaios mecânicos.	122
Figura 3.9 - Esquema da moldagem de placas.	123
Figura 3.10 - Drenômetro.	124
Figura 3.11 - Esquema do ensaio de absorção sonora.	126
Figura 3.12 - Fluxograma da etapa 4.	126
Figura 3.13 - Estrutura da modelação do ruído pneu-pavimento.	127

Figura 4.1 - Tambor giratório da Universidade Politécnica de Gdansk.	129
Figura 4.2 - Trailer-CPX de um pneu.	130
Figura 4.3 - Perfilômetro a laser.	131
Figura 4.4 - Aparato para medição do coeficiente de absorção.	131
Figura 4.5 - Trailer-CPX de dois pneus.	132
Figura 4.6 - Trailer-CPX de dois pneus.	132
Figura 4.7 - Pneus de referência do Trailer-CPX da M+P Consulting Engineers.	133
Figura 4.8 - Rolo compactador das amostras de laboratório.	133
Figura 4.9 - Esquema do equipamento RSAT.	134
Figura 4.10 - Equipamento RSAT da empresa Breijn B.V. Engenharia.	134
Figura 4.11 - Trailer-CPX do Cedex.	135
Figura 4.12 - Pneus de referência do Trailer-CPX. (a) AVON, (b) SRTT	135
Figura 4.13 - Planta baixa do projeto do Trailer-CPX.	136
Figura 4.14 - Vista lateral do projeto do Trailer-CPX.	136
Figura 4.15 - Posição dos microfones em planta.	137
Figura 4.16 - Posição dos microfones em vista lateral.	137
Figura 4.17 - Compartimento para colocação de carga.	137
Figura 4.18 - Construção do Trailer.	138
Figura 4.19 - Pintura da carenagem do Trailer.	138
Figura 4.20 - Visita técnica do Dr. Wim van Keulen.	139
Figura 4.21 - Workshop internacional sobre o ruído gerado pela interação pneu-pavimento.	140
Figura 4.22 - Colocação das espumas de alta absorção sonora.	140
Figura 4.23 - Colocação da saia removível.	141
Figura 4.24 - Trailer-CPX.	141
Figura 4.25 - Colocação do pneu de referência.	142
Figura 4.26 - Trailer-CPX finalizado.	142
Figura 4.27 - Acelerômetros instalados no Trailer.	143
Figura 4.28 - Espectro de aceleração (teste 01).	144
Figura 4.29 - Espectro de aceleração (teste 02).	144
Figura 4.30 - Espectro de aceleração (teste 03).	145
Figura 4.31 - Espectro de aceleração (teste 04).	145
Figura 4.32 - Para-lama do Trailer-CPX.	146
Figura 4.33 - Microfones para o Trailer-CPX.	146
Figura 4.34 - Analisador de dados.	147
Figura 4.35 - Espuma de alta absorção sonora.	147

Figura 4.36 - Coeficiente de absorção sonora fornecido pelo fabricante da espuma.....	148
Figura 4.37 - Espuma para o teste do coeficiente de absorção sonora (50 mm) (a) com película, (b) sem película.....	149
Figura 4.38 - Teste de absorção sonora na espuma com o tubo de impedância.	149
Figura 4.39 - Resultado do teste de absorção sonora na espuma.	150
Figura 4.40 - Resultado do teste de absorção sonora na espuma em terço de oitava.	150
Figura 4.41 - Ensaio de reflexão sonora com a estrutura do Trailer....	152
Figura 4.42 - Ensaio do teste do ruído do veículo de reboque.	154
Figura 4.43 - Resultado do teste do veículo de reboque em função da frequência.....	154
Figura 4.44 - Teste do ruído dos veículos externos.....	156
Figura 4.45 - Resultado do teste do ruído dos veículos externos.	156
Figura 4.46 - Resultado do teste do ruído dos veículos externos da média dos Microfones 3 e 4.	157
Figura 4.47 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento do Contorno de Araranguá BR-101 (Mistura convencional densa)	164
Figura 4.48 - Ensaio da mancha de areia no segmento do Contorno de Araranguá BR-101 (Revestimento com Microrrevestimento)	164
Figura 4.49 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da Avenida Beira-Mar, Lado Direito, sentido UFSC (Mistura densa convencional e com 30 anos de abertura ao tráfego).....	165
Figura 4.50 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da Avenida Beira-Mar, Lado Esquerdo-sentido centro.....	165
Figura 4.51 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da Avenida Beira-Mar (Mistura asfalto-borracha).....	165
Figura 4.52 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da SC-446 a BR-101, Criciúma (revestimento com asfalto-borracha, mistura tipo gap graded).....	166
Figura 4.53 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da SC-403 em Florianópolis (revestimento com asfalto-borracha).....	166
Figura 4.54 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste do Km 257, sentido sul da BR-101 (revestimento com ligante convencional)	166
Figura 4.55 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste do Túnel Antonieta de Barros, Florianópolis (pavimento rígido com cerca de 14 anos de abertura ao tráfego)	167

Figura 4.56 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste no Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC (pavimento rígido, com microfresagem nas duas faixas de rolamento)	167
Figura 4.57 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste do Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC (pavimento rígido, faixa do acostamento, com textura convencional, transversal)	167
Figura 4.58 - Mistura asfáltica densa (Contorno de Araranguá BR-101)	174
Figura 4.59 - Calibração dos microfones do Trailer-CPX	174
Figura 4.60 - Colocação dos microfones no Trailer-CPX.....	175
Figura 4.61 - Resultados do ensaio de medição do ruído em função da frequência (mistura asfáltica densa do Contorno de Araranguá)	176
Figura 4.62 - Microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101)	177
Figura 4.63 - Resultados do ensaio em função da frequência (microrrevestimento do Contorno de Araranguá)	178
Figura 4.64 - Mistura asfáltica densa (segmento Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC).....	179
Figura 4.65 - Resultados do ensaio em função da frequência (Av. Beira-Mar UFSC, sentido UFSC)	180
Figura 4.66 - Mistura asfáltica densa (segmento Avenida Beira-Mar UFSC, sentido centro).....	181
Figura 4.67 - Resultados do ensaio em função da frequência (Av. Beira-Mar UFSC, sentido centro)	182
Figura 4.68 - Mistura densa com asfalto-borracha (Av. Beira-Mar)... ..	183
Figura 4.69 - Resultados do ensaio em função da frequência (Mistura densa com asfalto-borracha - Av. Beira-Mar).....	184
Figura 4.70 - Mistura densa com asfalto-borracha (SC-403 Florianópolis)	185
Figura 4.71 - Resultados do ensaio em função da frequência (Mistura densa com asfalto-borracha da SC-403 Florianópolis)	186
Figura 4.72 – Mistura Gab graded com borracha (Criciúma)	187
Figura 4.73 - Resultados do ensaio em função da frequência (mistura tipo gap graded com asfalto-borracha).....	188
Figura 4.74 - Camada porosa de atrito CPA (BR-282)	189
Figura 4.75 - Colocação dos microfones para as medições na CPA... ..	189
Figura 4.76 - Resultados do ensaio em função da frequência (camada porosa de atrito).	190
Figura 4.77 - Resultados do ensaio em função da frequência (Mistura asfáltica densa convencional, BR-101, Km 257-Sentido Sul).	192
Figura 4.78 - Pavimento rígido no Túnel Antonieta de Barros.	193

Figura 4.79 - Resultados do ensaio em função da frequência (Pavimento rígido Túnel Antonieta de Barros).....	194
Figura 4.80 - Pavimento rígido do Morro do Agudo (faixa com microfresagem, paralela a atuação do tráfego).....	195
Figura 4.81 - Resultados do ensaio em função da frequência (Pavimento rígido do Morro Agudo da faixa com microfresagem).....	196
Figura 4.82 - Pavimento rígido do Morro do Agudo (faixa do acostamento com textura de vassoura de piaçava).	197
Figura 4.83 - Resultados do ensaio do Trailer-CPX em função da frequência (Pavimento rígido do Morro Agudo).....	198
Figura 4.84 - Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu AVON.	199
Figura 4.85 - Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu SRTT.	199
Figura 4.86 - Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu AVON (pavimento rígido).	203
Figura 4.87 - Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu SRTT (pavimento rígido).	203
Figura 4.88 - Extração de corpos de prova do trecho com a CPA.	205
Figura 4.89 - Colmatação da mistura asfáltica CPA.	206
Figura 4.90 - Equipamentos para medição da absorção sonora.	207
Figura 4.91 - Ensaio de absorção sem amostra.	208
Figura 4.92 - Curvas de absorção sonora da camada porosa de atrito do segmento teste na BR – 282.	208
Figura 4.93 - Mistura asfáltica CPA. Detalhe da água infiltrada na camada porosa e escoando para o acostamento.	209
Figura 4.94 - Viscosidade <i>versus</i> temperatura.	211
Figura 4.95 - Ensaio para determinação da porcentagem de vazios comunicantes.....	213
Figura 4.96 - Aspectos dos corpos de prova após o ensaio de cântabro	213
Figura 4.97 - Resultados do desgaste para os corpos de prova da mistura I.....	214
Figura 4.98 - Resultados do desgaste para os corpos de prova da mistura II.....	215
Figura 4.99 - Placas moldadas para ensaios de deformação permanente	217
Figura 4.100 - Ensaio de drenabilidade.....	219
Figura 4.101 - Desempenho à deformação permanente	220
Figura 4.102 - Curvas de absorção sonora da Mistura I.....	221
Figura 4.103 - Curvas de absorção sonora da Mistura II.....	222

Figura 4.104 - Curva de absorção sonora da Mistura I e II.....	223
Figura 4.105 - CPXI em função da macrotextura do revestimento.....	225
Figura 4.106 - Estimativa do índice acústico CPXI em função do pico de absorção sonora.....	226
Figura 4.107 - Estimativa do índice acústico CPXI em função do volume de vazios	226
Figura 4.108 - Estimativa do índice acústico CPXI em função da porcentagem de vazios comunicantes	227
Figura 4.109 - NPS para faixa de macrotextura de 1,69 a 1,74 mm ...	230
Figura 4.110 - NPS para faixa de macrotextura de 0,56 a 0,69 mm ...	230
Figura 4.111 - Relação entre o método CPB e o CPX	231
Figura 4.112 - Atenuação do ruído em função da distância.....	233
Figura 4.113 - Distância das edificações à Avenida Beira-Mar.....	234
Figura 4.114 - Distância da escola Luiz Candido Luz à SC-403.	234

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Nível de critério de avaliação para ambientes externos, em dB(A).....	35
Quadro 2.1 - Escala comparativa da pressão sonora e do nível de pressão sonora.	41
Quadro 2.2 - Mecanismos de geração mecânica.	48
Quadro 2.3 - Mecanismos de geração aerodinâmicos.	49
Quadro 2.4 - Resumo dos métodos de medição do ruído pneu-pavimento.	65
Quadro 2.5 - Classes de redução do ruído dos revestimentos.	75
Quadro 2.6 - Resumo da classificação da textura.....	80
Quadro 2.7 - Classificação da macrotextura pelo método da Mancha de Areia.	84
Quadro 2.8 - Avaliação da microtextura do pavimento.	85
Quadro 2.9 - Valores mínimos sugeridos do BPN.	86
Quadro 2.10 - Faixa granulométrica do WSDOT para misturas de baixo ruído.	94
Quadro 2.11 - Faixa granulométrica de uma mistura de baixo ruído. ...	94
Quadro 2.12 - Faixas granulométricas das misturas asfálticas de baixo ruído da Espanha.	95
Quadro 2.13 - Mistura asfáltica de baixo ruído da Lituânia.	96
Quadro 2.14 - Faixa granulométrica de uma mistura asfáltica de baixo ruído da Suíça.....	96
Quadro 2.15 - Estimativa do efeito da água no nível de pressão sonora.	100
Quadro 2.16 - Influência da temperatura no ruído pneu-pavimento ...	102
Quadro 2.17 - Velocidade de referência/nível de pressão sonora para diferentes categorias de veículos e rodovias.	104
Quadro 2.18 - Valor médio do Nível CPX de 7 microfones para diferentes modelos de pneus com velocidade de referência de 80 km/h.....	105
Quadro 2.19 - Efeito da dureza do pneu no aumento do nível de pressão sonora.	106
Quadro 3.1 - Granulometrias das misturas de baixo ruído	118
Quadro 4.1 - Valores do coeficiente de absorção para cada frequência de terço de oitava.	151
Quadro 4.2 - Resultados do teste da reflexão.	153
Quadro 4.3 - Resultados do teste do veículo de reboque.....	154
Quadro 4.4 - Resultados da caracterização dos agregados.....	158
Quadro 4.5 - Granulometria da mistura asfáltica densa (Avenida Beira-Mar UFSC).....	159

Quadro 4.6 - Granulometria da mistura asfáltica com borracha	160
Quadro 4.7 - Granulometria do microrrevestimento	160
Quadro 4.8 - Granulometria da camada porosa de atrito	161
Quadro 4.9 - Granulometria da mistura asfáltica do tipo gap graded .	161
Quadro 4.10 - Granulometria da mistura asfáltica densa da SC-403 ..	162
Quadro 4.11 - Granulometria da mistura asfáltica densa da BR 101-Km 257.	163
Quadro 4.12 - Macrotextura da mistura densa convencional (Contorno de Araranguá BR-101) Com dois anos de atuação do tráfego.	168
Quadro 4.13 - Macrotextura do microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101), com um ano de atuação do tráfego.	168
Quadro 4.14 - Macrotextura da mistura densa convencional (Avenida Beira-Mar, UFSC, sentido UFSC), com cerca de 30 anos de atuação do tráfego.	168
Quadro 4.15 - Macrotextura da mistura densa convencional (Avenida Beira-Mar, estação de teste UFSC, sentido centro), com cerca de 30 anos de atuação do tráfego.	169
Quadro 4.16 - Macrotextura da mistura com asfalto-borracha (Avenida Beira-Mar), com quatro anos de atuação do tráfego.	169
Quadro 4.17 - Macrotextura da mistura densa com asfalto-borracha (SC 403 - Florianópolis), com um ano de atuação do tráfego.	169
Quadro 4.18 - Macrotextura da mistura do tipo gap graded com asfalto-borracha (Trecho: SC-446 à BR-101, Criciúma). Sem tráfego até o momento (abril de 2016).	170
Quadro 4.19 - Macrotextura da mistura densa convencional (BR-101, Km 257 sentido sul), com dois anos de atuação do tráfego.	170
Quadro 4.20 - Macrotextura do pavimento rígido (Túnel Antonieta de Barros), com 14 anos de atuação do tráfego.	170
Quadro 4.21 - Macrotextura do pavimento rígido da faixa microfresada (Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC), com 5 anos de atuação do tráfego.	171
Quadro 4.22 - Macrotextura do pavimento rígido acostamento (Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC). Sem atuação do tráfego.	171
Quadro 4.23 - Resumo da macrotextura dos revestimentos das rodovias avaliadas.	172
Quadro 4.24 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura asfáltica densa do Contorno de Araranguá)	175
Quadro 4.25 - CPXI da mistura asfáltica densa do Contorno de Araranguá	175
Quadro 4.26 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Microrrevestimento do Contorno de Araranguá).	177

Quadro 4.27 - CPXI do microrrevestimento do Contorno de Araranguá	178
Quadro 4.28 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC)	179
Quadro 4.29 - CPXI da mistura asfáltica densa da Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC.	180
Quadro 4.30 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Avenida Beira-Mar UFSC, sentido centro)	181
Quadro 4.31 - CPXI da mistura asfáltica densa da Avenida Beira-Mar UFSC, sentido centro.	182
Quadro 4.32 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura asfáltica com borracha - Av. Beira-Mar).....	183
Quadro 4.33 - CPXI da mistura com asfalto-borracha - Av. Beira-Mar	183
Quadro 4.34 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura densa com asfalto-borracha da SC-403 Florianópolis)	185
Quadro 4.35 - CPXI da mistura densa com asfalto-borracha da SC-403 Florianópolis	185
Quadro 4.36 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura tipo gab graded com asfalto-borracha).....	187
Quadro 4.37 - CPXI da mistura asfáltica tipo gab graded com borracha	187
Quadro 4.38 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Camada porosa de atrito).....	190
Quadro 4.39 - CPXI da camada porosa de atrito CPA.	190
Quadro 4.40 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura asfáltica densa convencional (BR-101, Km 257-Sentido Sul)).	191
Quadro 4.41 - CPXI da mistura asfáltica densa convencional (BR-101, Km 257-Sentido Sul).....	191
Quadro 4.42 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Pavimento rígido do Túnel Antonieta de Barros).	193
Quadro 4.43 - CPXI do pavimento rígido do Túnel Antonieta de Barros.	193
Quadro 4.44 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo, faixa microfresada)....	195
Quadro 4.45 - CPXI do pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo, faixa microfresada.	195
Quadro 4.46 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo, textura com vassoura de piaçava).	197

Quadro 4.47 - CPXI do pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo (textura com vassoura de piaçava).	197
Quadro 4.48 - CPXI das misturas asfálticas dos revestimentos avaliados.	200
Quadro 4.49 - Resultados do CPX e CPB dos revestimentos estudados para velocidade de 80 km/h.	202
Quadro 4.50 - CPXI para o pavimento rígido com velocidade de 80 km/h.	204
Quadro 4.51 - CPXI para o pavimento rígido e flexível.	204
Quadro 4.52 - Volume de vazios e vazios comunicantes da CPA.	206
Quadro 4.53 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.	210
Quadro 4.54 - Resultados do ensaio de caracterização do ligante.	210
Quadro 4.55 - Temperaturas de usinagem e compactação da mistura recomendado pelo fornecedor do ligante (Greca Asfaltos S.A.).....	211
Quadro 4.56 - Resultados do ensaio de cântabro da mistura I	213
Quadro 4.57 - Resultados do ensaio de cântabro da mistura II.....	214
Quadro 4.58 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida. .	216
Quadro 4.59 - Resultados do volume de vazios e vazios comunicantes das placas	217
Quadro 4.60 - Resumo da porcentagem dos volumes de vazios e vazios comunicantes dos corpos de prova.....	218
Quadro 4.61 - Resultados do ensaio de drenabilidade das placas	219
Quadro 4.62 - Resumo dos resultados mecânicos para as misturas I e II.	223
Quadro 4.63 - Modelação do ruído pneu-pavimento para as misturas I e II.....	229
Quadro 4.64 - Distância mínima de conforto à comunidade lindeira para velocidade do tráfego de 80 km/h.	232

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	31
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
1.2 OBJETIVOS.....	33
1.2.1 Objetivo Geral	33
1.2.2 Objetivos Específicos.....	33
1.3 JUSTIFICATIVA	33
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	37
2.1 PRINCÍPIOS DA ACÚSTICA PARA O RUÍDO DE TRÁFEGO	37
2.1.1 Frequência	37
2.1.2 Nível de Pressão Sonora (NPS).....	40
2.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DO RUÍDO DO TRÁFEGO	46
2.2.1 Mecanismos de Geração Mecânica	47
2.2.2 Mecanismos de Geração Aerodinâmica	49
2.3 ABSORÇÃO SONORA	50
2.3.1 Absorção sonora na mistura asfáltica.....	50
2.3.2 Tubo de impedância	53
2.3.3 Impedância acústica	56
2.3.4 Medições da absorção sonora nas misturas asfálticas	57
2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO	64
2.4.1 Close Proximity Method - CPX (Método da estrada proximidade) ..	66
2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO GERADO PELA INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO	75
2.5.1 Revestimento do Pavimento	75
2.5.1.1 Porosidade do revestimento do pavimento	77
2.5.1.2 Textura superficial do pavimento	79
2.5.1.3 Granulometria	93
2.5.1.4 Impedância mecânica e idade da superfície do revestimento...	96
2.5.2 Condições Climáticas	99
2.5.3 Veículos	102
2.5.3.1 Tipo de veículo	103
2.5.3.2 Tipo de pneu	104
2.5.3.3 Velocidade do veículo	106

2.6	RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	108
-----	---------------------------------------	-----

CAPÍTULO 3 - MÉTODO DA PESQUISA 111

3.1	ETAPA 1 – PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TRAILER-CPX	113
-----	---	-----

3.1.1	Visita aos centros de pesquisas e empresas	113
3.1.2	Projeto do Trailer-CPX	114
3.1.3	Construção do Trailer-CPX	114
3.1.4	Certificação do Trailer-CPX	114

3.2	ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO EM RODOVIAS CATARINENSES 114	
-----	---	--

3.2.1	Seleção das rodovias	115
3.2.2	Caracterização do tipo de revestimento	115
3.2.3	Caracterização da textura em campo	116
3.2.4	Método de Medição do Ruído	116
3.2.5	Análise dos resultados	116

3.3	ETAPA 3 – DESENVOLVIMENTO DO REVESTIMENTO DE BAIXO RUÍDO 117	
-----	---	--

3.3.1	Capacidade de absorção sonora da mistura CPA	117
3.3.2	Granulometria das misturas	118
3.3.3	Caracterização dos materiais	119

3.3.3.1	Agregados	119
3.3.3.2	Ligante asfáltico	120

3.3.4	Projeto da mistura	120
-------	--------------------------	-----

3.3.4.1	Ensaio mecânicos e de Perda de Massa	121
---------	--	-----

3.3.5	Moldagem das placas	123
-------	---------------------------	-----

3.3.5.1	Ensaio de drenabilidade	124
3.3.5.2	Ensaio de deformação permanente	124

3.3.6	Ensaio de absorção sonora	125
-------	---------------------------------	-----

3.4	ETAPA 4 – MODELAÇÃO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO	126
-----	---	-----

3.4.1	Dados experimentais	127
3.4.2	Desenvolvimento do modelo	127

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES..... 129

4.1	PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TRAILER-CPX	129
-----	---	-----

4.1.1	Visita aos centros de pesquisas e empresas	129
4.1.2	Projeto do Trailer-CPX	135

4.1.3	Construção do Trailer-CPX	138
4.1.4	Certificação do Trailer-CPX	146
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO EM RODOVIAS CATARINENSES 157	
4.2.1	Caracterização dos tipos de revestimentos	158
4.2.1.1	Mistura asfáltica densa (Contorno de Araranguá BR-101)	158
4.2.1.2	Mistura asfáltica densa (Avenida Beira-Mar UFSC)	158
4.2.1.3	Mistura asfáltica densa com borracha (Avenida Beira-Mar) .	159
4.2.1.4	Microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101)	160
4.2.1.5	Camada porosa de atrito CPA (Trecho: Lages-Campos Novos, BR-282)	160
4.2.1.6	Mistura asfáltica do tipo gap graded (Trecho: SC-446 a BR-101, Criciúma)	161
4.2.1.7	Mistura asfáltica densa (SC-403, Florianópolis)	162
4.2.1.8	Mistura asfáltica densa (BR-101, Km 257 – sentido sul).	162
4.2.1.9	Pavimento rígido	163
4.2.2	Caracterização da textura em campo	163
4.2.3	Medição do Ruído Pneu-Pavimento	173
4.2.3.1	Resultados para Mistura asfáltica densa (Contorno de Araranguá BR-101)	174
4.2.3.2	Resultados do ensaio para o Microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101)	177
4.2.3.3	Resultados do ensaio para mistura asfáltica densa (Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC)	179
4.2.3.4	Resultados do ensaio para a mistura asfáltica densa (Avenida Beira-Mar UFSC, sentido centro)	181
4.2.3.5	Resultados do ensaio para mistura densa com asfalto-borracha (Avenida Beira-Mar)	182
4.2.3.6	Resultados do ensaio para mistura densa com asfalto-borracha (SC-403 Florianópolis)	184
4.2.3.7	Resultados do ensaio na mistura do tipo gap graded com asfalto- borracha	186
4.2.3.8	Resultados do ensaio para a camada porosa de atrito-CPA (BR- 282)	188
4.2.3.9	Resultados do ensaio na mistura asfáltica densa convencional (BR-101, sentido Sul)	191
4.2.3.10	Resultados do ensaio para o Pavimento Rígido (Túnel Antonieta de Barros)	192
4.2.3.11	Resultados do ensaio para o Pavimento Rígido na faixa microfresada (Túnel do Morro Agudo Paulo, Lopes-SC)	194
4.2.3.12	Resultados do ensaio para o Pavimento Rígido na faixa do acostamento (Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC)	196

4.2.4	Análise dos Resultados do Ruído Pneu-Pavimento	198
4.2.4.1	Misturas asfálticas	198
4.2.4.2	Pavimento rígido	202
4.3	DESENVOLVIMENTO DO REVESTIMENTO DE BAIXO RUÍDO	205
4.3.1	Capacidade de Absorção Sonora da Mistura CPA – BR 282	205
4.3.2	Caracterização dos Materiais Para o Desenvolvimento do	
Revestimento de Baixo Ruído	210	
4.3.2.1	Agregados	210
4.3.2.2	Ligante Asfáltico	210
4.3.3	Projeto da mistura	212
4.3.3.1	Definição das granulometrias das misturas	212
4.3.3.2	Moldagem dos corpos de prova	212
4.3.3.3	Ensaio de cântabro	212
4.3.3.4	Ensaio de dano por umidade induzida	216
4.3.4	Moldagem das placas e ensaios de deformação permanente e	
drenabilidade	217	
4.3.4.1	Caracterização da drenabilidade	218
4.3.4.2	Ensaio de deformação permanente	219
4.3.5	Ensaio de absorção sonora	220
4.3.6	Escolha da mistura asfáltica de baixo ruído	222
4.4	MODELAÇÃO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO	224
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES		235
REFERÊNCIAS		237
ANEXO 1 – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO CPXI. 251		
MISTURA ASFÁLTICA Densa (BR-101 CONTORNO DE ARARANGUÁ)		253
MICRORREVESTIMENTO BR-101 (CONTORNO DE ARARANGUÁ)		263
ASFALTO-BORRACHA (BEIRA-MAR)		273
MISTURA ASFÁLTICA Densa (AV. BEIRA-MAR, UFSC LADO ESQUERDO)		283
MISTURA ASFÁLTICA Densa (AV. BEIRA-MAR, UFSC LADO DIREITO)		293
MISTURA ASFÁLTICA Densa (BR-101, KM 257-SUL)		303
MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO GAP GRADED (CRICIÚMA)		313
MISTURA ASFÁLTICA Densa COM BORRACHA (SC 403 - FLORIANÓPOLIS)		323
MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO CPA		333
PAVIMENTO RÍGIDO (TÚNEL ANTONIETA DE BARROS)		343

PAVIMENTO RÍGIDO (TÚNEL DO MORRO AGUDO) MICROFRESADO.....	353
PAVIMENTO RÍGIDO (TÚNEL DO MORRO AGUDO) ACOSTAMENTO.....	363

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o crescimento da população e a densificação cada vez maior das áreas urbanas tem-se o aumento do nível do ruído gerado, que é um dos principais impactos decorrentes desse processo. A necessidade da mobilidade das populações contribui com uma grande parcela para a geração deste ruído.

O ruído gerado pelo transporte gera um grande impacto ambiental. Causam danos irreversíveis ao meio ambiente e têm sido alvo de inúmeros estudos e pesquisas (SYGNA *et al.*, 2014).

Em diversos países, principalmente nos países da Europa, o ruído produzido pelo tráfego rodoviário é alvo de intensas pesquisas nos últimos anos, uma vez que em torno de 60% da população Europeia está exposta a esse ruído. Como consequências dessa exposição, podem ocorrer diversos efeitos na saúde humana, como por exemplo, perturbações no sono, interferências na comunicação e no desempenho intelectual, perda de memória, dores de cabeça, náuseas, perdas auditivas temporárias e definitivas (WHO, 2009).

Um estudo recente realizado em pessoas aposentadas (acima de 65 anos), mostrou que a exposição contínua de elevados níveis de pressão sonora aumenta significativamente o risco de morte por doenças cardiovasculares (GIRARD *et al.*, 2014).

A relação entre o ruído do tráfego e a saúde da população vem sendo estudada profundamente. Recentemente, um estudo realizado na Espanha, mostrou que a exposição a elevados níveis de pressão sonora aumenta consideravelmente o risco de morte por doenças respiratórias e cardiovasculares. Foi encontrada uma relação entre o descritor LeD (Nível Sonoro Equivalente Diurno (8-22 h)) e a mortalidade causada por essas doenças. Um decréscimo de 1 dB(A) no LeD implicou na redução de 284(31.523) óbitos causados por doenças cardiovasculares e de 184(356) óbitos causados por doenças respiratórias em uma população de 592.271 pessoas acima de 65 anos de idade (TOBÍAS *et al.*, 2015).

A organização mundial de saúde (OMS) alerta que a exposição contínua a níveis de ruído entre 55 e 65 decibels provoca prejuízos à comunicação e ao aprendizado, principalmente. Valores acima desses citados podem causar danos para a saúde, alguns de forma irreversível.

Nos EUA é definido que os níveis de pressão sonora gerados pelo tráfego quando excedidos de 67 dB (A), soluções devem ser tomadas para a redução desse ruído (FHWA, 2006).

Com o agravamento deste problema, algumas soluções vêm sendo estudadas com o intuito de reduzir o ruído gerado pelo tráfego nos grandes centros urbanos, tais como construção de revestimentos de baixo ruído, a instalação de barreiras acústicas, o controle de velocidade e a mudança na geometria das vias.

A primeira vez que os revestimentos porosos foram reportados foram nos EUA, que primeiramente foram projetados para eliminar a película de água que se forma na superfície do pavimento em dias de chuva, aumentando assim, a aderência pneu-pavimento. Posteriormente, verificou-se que estes revestimentos poderiam ser chamados de revestimentos de baixo ruído, pois os mesmos tinham uma redução significativa do ruído da interação pneu-pavimento (SANDBERG & EJSMONT, 2002; FEHRL, 2006; SANTOS, 2007).

Também chamados de revestimento de baixo ruído, as camadas de revestimento fino (Thin layer surfacings) são muito populares na Holanda e em outros países da Europa pela sua capacidade de redução do ruído gerado pela interação pneu-pavimento (LI *et al.*, 2014).

Um dos métodos de medição do ruído da interação pneu-pavimento mais utilizado em todo o mundo é o do Trailer-CPX (Close Proximity Method). Ele consegue avaliar com precisão a influência do ruído pneu-pavimento sobre condições em que ele é dominante (LICITRA *et al.*, 2014).

São diversos os mecanismos de geração do ruído da interação pneu-pavimento, que podem ser divididos em duas parcelas principais. A primeira é a de geração do ruído mecânico e está diretamente relacionada com a textura do revestimento. Já a segunda, é a parcela de geração de ruído aerodinâmico e está correlacionado, principalmente, com a porosidade do revestimento. Essas duas parcelas podem ser reduzidas otimizando a textura e a porosidade da mistura asfáltica, sendo esse o contexto principal em que se insere essa tese.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Construir um Trailer para medir o ruído resultante da interação pneu-pavimento e, ainda, desenvolver uma mistura asfáltica de baixo ruído otimizando a sua capacidade de absorção sonora, sendo capaz de produzir um revestimento de baixa emissão de ruído.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar medições de nível de ruído em campo para os diferentes tipos de revestimento utilizando o trailer CPX;
- Correlacionar a capacidade de absorção sonora da mistura com a geração do ruído em campo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Diversos são os estudos em todo mundo que comprovam que a exposição do ser humano ao ruído, geram vários tipos de doenças. No Instituto Dinamarquês de rodovias foi comprovado que existe uma relação entre o ruído de tráfego e a incidência de doenças cardíacas (SANDBERG & EJSMONT, 2002; BENDTSEN, 2009; WHO, 2011; TOBIÁS *et al.*, 2015).

A exposição do ser humano a elevados níveis de ruído acarreta em diversos tipos de alterações. As mais relevantes são: dilatação das pupilas; hipertensão sanguínea; mudanças gastrointestinais; alterações na glicose sanguínea e na proteína do sangue, reações musculares mudanças na produção de cortisona, do hormônio da tireoide e de adrenalina, entre outras. O ruído também é prejudicial durante o sono, onde existem evidências do aumento da frequência cardíaca e mudanças no ciclo do sono leve e pesado (WHO, 2011).

Em um estudo realizado na Alemanha com 1048 crianças, em idades entre 8 e 14 anos, revelou que aquelas que foram expostas a altos níveis de ruído do tráfego rodoviário apresentaram pressão arterial mais elevada (BABISCH *et al.*, 2009).

O ruído é um dos tipos de poluição ambiental mais relevantes dos últimos anos e o ruído gerado pelo tráfego, muitas vezes, é o responsável principal componente do ruído total (JONES, 2004).

Em 1989, em um congresso realizado na Suécia, o ruído passou a ser levado em consideração pela Organização Mundial de Saúde (OMS), em que medidas deveriam ser tomadas para a redução do ruído em escala mundial (JUNIOR, 2006).

Estima-se que nos países europeus, 20% da população é atingida por níveis de ruído acima de 65 dB(A) durante o dia e que 30 % está exposta a valores acima de 55 dB(A) durante o período noturno, sendo este considerado como limite para a preservação da saúde e do conforto (WHO, 2011).

Estudos mostram que uma de cada três pessoas, está irritada durante o dia por conta do ruído do tráfego e um em cada cinco, tem dificuldades de dormir por causa deste mesmo passivo. Há evidências de que aqueles indivíduos que são cronicamente expostos a níveis elevados de ruído, têm um risco maior de adquirir doenças cardiovasculares. Assim, a poluição sonora é considerada não só um incômodo ambiental, mas também uma ameaça para a saúde pública (WHO, 2011).

Sygna *et al.* (2014) estudaram a relação entre o ruído de tráfego e a qualidade do sono das pessoas. Os resultados mostraram que o ruído de tráfego está associado à baixa qualidade do sono dos indivíduos analisados.

Além de prejudicial à saúde, o ruído também afeta a economia. Estudos na Suécia mostram que a poluição sonora apresenta um prejuízo que varia 0,2 a 2% do Produto Interno Bruto (PIB). Sandberg (2001) afirma, que as perdas causadas pelo ruído de tráfego chegam a 330 milhões de dólares por ano. Tais perdas estão ligadas, principalmente, a desvalorização imobiliária.

Com a necessidade de ampliação da capacidade de tráfego para suprir o crescimento das cidades e necessidade de mobilidade, quase sempre sem estudos aprofundados, frequentemente são gerados níveis de ruído muito acima dos adequados. Áreas que poderiam ser destinadas, por exemplo, para educação, não são adequadas. Vários municípios no Brasil vêm dando importância para o ruído urbano, através de leis e regulamentações que fixam o zoneamento adequado para os polos geradores de ruído. No entanto, a via de tráfego não vem sendo considerada como uma fonte de ruído. Apenas a NBR 10151/2000 fixa que os limites do ruído em comunidades devem estar de acordo com o Quadro 1.1, em que, para os ambientes internos é feita a correção de -10 dB(A) para janela aberta e -15 dB(A) para janela fechada.

Quadro 1.1 - Nível de critério de avaliação para ambientes externos, em dB(A).

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: (NBR 10151/2000).

No Brasil não existe uma legislação específica para a redução do ruído do tráfego, e muito menos, dados dos níveis de pressão sonora das rodovias para que se tenha o seu nível acústico de referência.

É necessária uma caracterização acústica dos revestimentos dos pavimentos brasileiros, e um estudo das propriedades que influenciam a geração e a propagação do ruído de tráfego.

Espera-se que essa pesquisa seja uma ferramenta chave para o estudo do ruído pneu-pavimento nas rodovias brasileiras e que ajude na implantação de políticas destinadas à melhoria da qualidade das superfícies das rodovias do Brasil, no sentido de melhorar a qualidade de vida das populações próximas às rodovias e vias urbanas.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PRINCÍPIOS DA ACÚSTICA PARA O RUÍDO DE TRÁFEGO

O som se caracteriza por flutuações de pressão em um meio compressível em que existem determinados limites de frequência para que a sensação de som ocorra no ouvido humano. Ele se propaga através de um meio em forma de ondas esféricas com uma configuração sinusoidal, onde o ar é o meio mais frequente na transmissão do impulso sonoro até ao sistema auditivo do Homem (GERGES, 2000).

O ruído pode ser definido como "um som indesejável". O que diferencia o som de um ruído é a reação provocada no indivíduo receptor após a detecção do impulso sonoro pelo sistema auditivo, podendo ser agradável ou não (HANSON *et al.*, 2004 e CARVALHO, 2011).

2.1.1 Frequência

A frequência indica o número de ocorrências de um evento em um determinado intervalo de tempo. Tem como principal unidade o Hertz (número de oscilações por segundo).

O ouvido humano jovem tem a capacidade de escutar apenas uma faixa de frequências compreendidas entre os 20 Hz e os 20 kHz. O limite superior da audição humana decresce com a idade, podendo chegar a atingir apenas 4 kHz (EVEREST e POHLMANN, 2009).

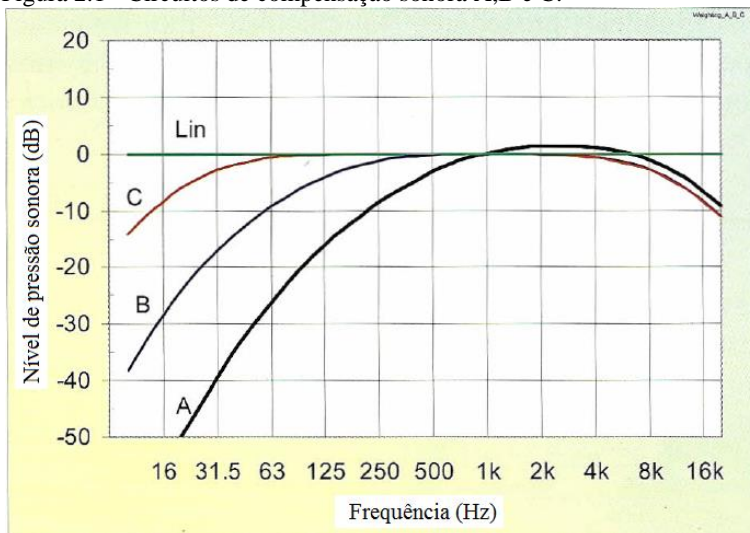
A sensibilidade do ouvido humano para as diferentes faixas de frequências audíveis não é uniforme. Por exemplo, a sensibilidade auditiva diminui acentuadamente para as frequências baixas e, da mesma forma, para frequências muito altas. Infelizmente, o ouvido humano é mais sensível na faixa de frequência em que o ruído pneu-pavimento ocorre, ou seja, entre cerca de 1 kHz a 5 kHz. Portanto, é importante que os instrumentos utilizados para avaliar os impactos de ruído tenham uma resposta de frequência relacionada com a do ouvido humano (FEHRL, 2006).

Para que os dispositivos de captação sonora possam interpretar os dados de acordo com o comportamento do ouvido humano, é frequente se utilizar os filtros de ponderação para que os aparelhos de medição imitem a sensibilidade do ouvido humano (BERGLUND *et al.*, 1999).

Dentre os vários tipos de filtros existentes, o filtro A é o mais utilizado. Ele tem como função diminuir as diferenças entre os resultados dos equipamentos de medição e a percepção humana aos estímulos sonoros (SANDBERG & EJSMONT, 2002). A Figura 2.1 mostra as

curvas de ponderação dos filtros A, B e C, sendo que as curvas B e C já estão em desuso.

Figura 2.1 - Circuitos de compensação sonora A,B e C.

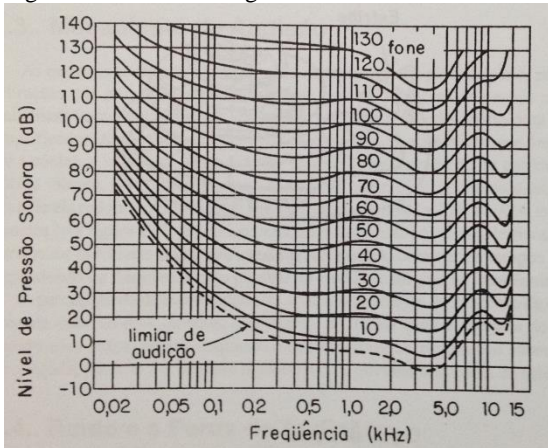


Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

A curva de ponderação A e a forma de como se comporta o ouvido humano foi determinada através das curvas Isofônicas (Figura 2.2) que são as curvas de igual sonoridade. As curvas Isofônicas estabelecem medidas subjetivas da sonoridade de tons puros. As curvas de sonoridade foram desenvolvidas através de simulações do comportamento do ouvido humano em experimentos audiométricos, realizados em uma grande amostra de pessoas com ouvidos saudáveis.

Cada curva tem como unidade o fone, que é numericamente igual ao nível de pressão sonora (dB) estabelecido no ensaio. A escala de ponderação “A” baseia-se na atenuação do ouvido humano que foi retirada da curva de 40 fones.

Figura 2.2 - Curvas de igual sonoridade.



Fonte: Gerges (2000).

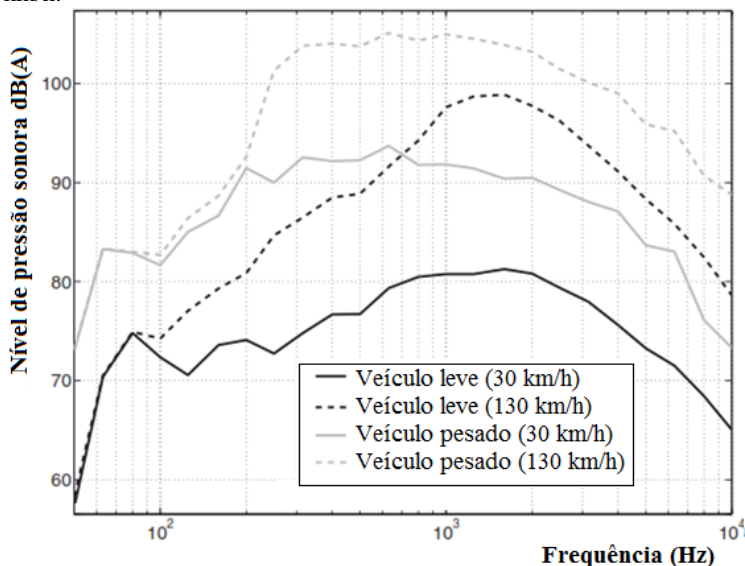
Devido à grande quantidade de frequências audíveis, geralmente é conveniente agrupá-las em bandas de dimensões normalizadas com larguras definidas. Existem bandas de várias larguras, sendo que as mais usadas são a de 1 oitava e 1/3 de oitava (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

A Equação 2.1 determina os intervalos das frequências das f_1 e f_2 para a banda de 1/3 de oitava, onde f_0 é a frequência central da banda.

$$f_0 = \sqrt{f_1 \times f_2} ; \frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{3}} \text{ [Hz]}. \quad (2.1)$$

A Figura 2.3 apresenta os espectros em bandas de 1/3 de oitava, filtradas com a curva de ponderação A obtidos para um automóvel e para um veículo pesado em um mesmo revestimento asfáltico a uma velocidade de 30 e 130 km/h.

Figura 2.3 - Frequência característica do som para uma velocidade de 30 e 130 km/h.



Fonte: Renterghem & Botteldooren (2012).

2.1.2 Nível de Pressão Sonora (NPS)

A pressão sonora (Pa) é utilizada para definir os níveis ou a intensidade do ruído, em que o decibel (dB) é a unidade logarítmica que expressa a razão entre a pressão sonora que está sendo medida e uma de referência (GERGES, 2000).

O ouvido humano pode detectar flutuações de pressão sonora tão baixas quanto a $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ (limiar da audição) e flutuações maiores, até que a dor física comece (10^2 N/m^2) (EVEREST e POHLMANN, 2009).

O uso da escala logarítmica leva a uma mudança de parâmetro, deixando de se chamar Pressão Sonora, em Pascal, e passando a ser chamado de Nível de Pressão Sonora (NPS), em decibel, correspondente ao termo inglês Sound Pressure Level (SPL) (WAYSON, 1998).

A diferença entre nível de pressão sonora (NPS) e pressão sonora é muito significativa, como é mostrado no Quadro 2.1. Com o uso do logaritmo, a escala de valores do som é reduzida. A escala transforma-se agora em 0 dB (ponto inicial do ato de ouvir) até aproximadamente 130 dB (ponto inicial da dor) (SANDBERG & EJSMONT, 2002).

Quadro 2.1 - Escala comparativa da pressão sonora e do nível de pressão sonora.

Fonte Sonora	Pressão Sonora (μPa)	Nível de Pressão Sonora (dB)
Lançamento de um foguete	200.000.000	140
Motor de um jato	63.245.555	130
Show de Rock em frente ao palco	6.324.555	110
Caminhão a 70 Km/h	200.000	80
Conversa normal (1 metro de distância)	20.000	60
Sussurrar	632	30
Quarto silencioso	200	20
Câmara para medição de ruído	20	0

Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

Assim, a unidade usada internacionalmente para descrever as flutuações da pressão sonora é o decibel (dB). Ele indica o nível de pressão sonora (L_p) e é calculado pela equação 2.2 (FEHRL, 2006).

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_o^2} \right) \text{ [dB]} \quad (2.2)$$

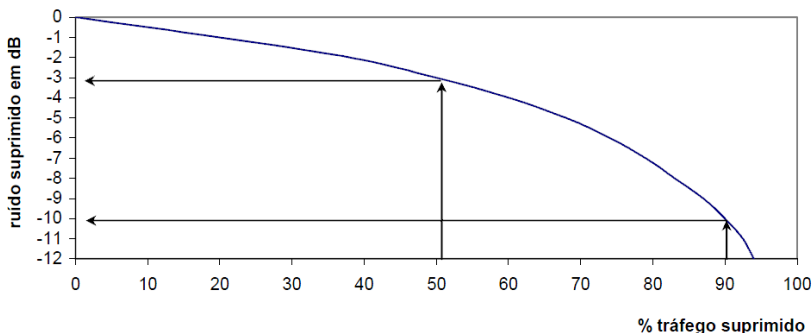
onde:

- L_p : representa o nível de pressão sonora, em dB;
- P : é a pressão sonora eficaz, em N/m^2 ;
- P_o : é a pressão sonora de referência ($2 \times 10^{-5} N/m^2 = 20 \mu N/m^2$).

O ouvido humano saudável pode perceber uma mudança de sonoridade quando ocorre uma variação do nível de pressão sonora (NPS) de cerca de 3 dB.

A Figura 2.4 mostra que, caso se consiga reduzir em 3 dB o ruído provocado pela interação pneu-pavimento, por exemplo utilizando revestimentos de baixo ruído, seria como reduzir o tráfego em 50%.

Figura 2.4 - Decréscimo do nível de pressão sonora em função do decréscimo de volume de tráfego.



Fonte: Raitanen (2005).

O ruído do tráfego a partir de um fluxo de veículos varia ao longo do tempo devido a diversos fatores. Para descrever como a duração do som varia ao longo do tempo, são usados vários descritores. Entre eles os mais utilizados são: o nível de ruído máximo ($L_{\text{máx}}$) e o nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}) em que L representa um nível de pressão sonora (SANDBERG & EJSFONT, 2002).

O nível de pressão sonora pode ser expresso em dB(A) ou em dB, ou seja, com ou sem os filtros de ponderação A. Quando a ponderação do filtro é utilizada, o descriptor fica representado por LA_{eq} (FEHRL, 2006).

Com esse descriptor é possível determinar um índice de pressão sonora para um determinado fluxo de veículos ao longo do tempo. Esse descriptor também é utilizado no Brasil para avaliar os níveis de ruído em escolas, hospitais e residências (CALLAI, 2011).

Para as condições de alta intensidade de tráfego, onde as variações do ruído são grandes, é necessário converter esta flutuação de nível de ruído a um simples valor significativo, ou seja, uma média ao longo do tempo. Essa média é o nível de pressão sonora equivalente (LA_{eq}) (JUNIOR, 2006), que é expresso pela equação 2.3 (FEHRL, 2006):

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right] \text{ [dBA]} \quad (2.3)$$

onde:

- L_{Aeq} : é o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A, em dB(A);
- T: é o período de tempo durante o qual se calcula L_{Aeq} , em s;
- p: é a pressão sonora instantânea ponderada em A, em Pa;
- p_0 : é a pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa = 20 μ Pa).

Quando o ruído é constituído por um pequeno número de eventos isolados, o nível de ruído máximo LA_{max} é o melhor indicado para ser utilizado. O LA_{max} representa o nível de ruído máximo que ocorre por um curto período de tempo (BERGLUND et al., 1999).

A propagação dos níveis de pressão sonora em um campo aberto acontece em todas as direções e uniformemente, diminuindo sua amplitude à medida que o observador se afasta da fonte sonora (NELSON e PHILLIPS, 1994).

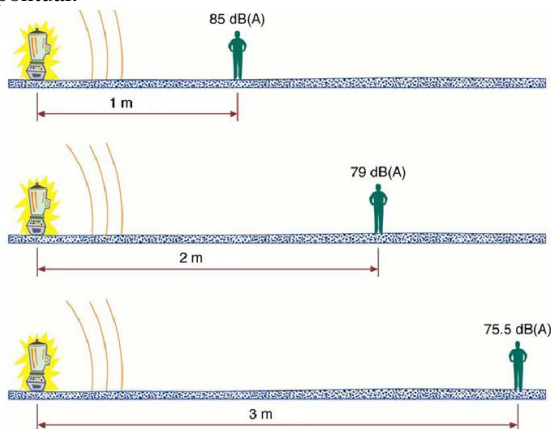
A Figura 2.5 mostra que a atenuação do ruído não é linear com a distância de afastamento. Quando o observador é afastado do dobro da distância inicial, a atenuação é 6 dB (A), triplicando a distância inicial, esse valor sobe para 9,5 dB(A) (HANSON *et al.*, 2004). Essa relação pode ser calculada através da equação 2.4.

$$L_A = L_{ref} - 20 \log \left(\frac{r}{r_{ref}} \right) \quad (2.4)$$

onde:

- L_A : é o nível sonoro a uma distância r, em dB(A);
- L_{ref} : é o nível sonoro de referência, em dB(A);
- r: é a distância entre fonte do ruído e o receptor, em m;
- r_{ref} : é a distância de referência, em m.

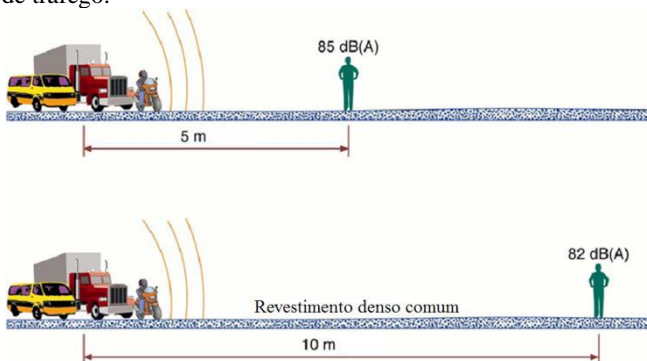
Figura 2.5 - Efeito da distância no nível de pressão sonora a partir de uma fonte pontual.



Fonte: Hanson *et al.* (2004).

No entanto, quando se trata de um fluxo de tráfego e não mais como fonte individual, as ondas sonoras se comportam como ondas cilíndricas e o nível de pressão sonora diminui em um grau inferior ao ilustrado na Figura 2.5. Neste caso cada vez que a distância é dobrada, há uma perda de 3 dB (FEHRL, 2006). A Figura 2.6 mostra esse comportamento.

Figura 2.6 - Efeito da distância no nível de pressão sonora a partir de um fluxo de tráfego.

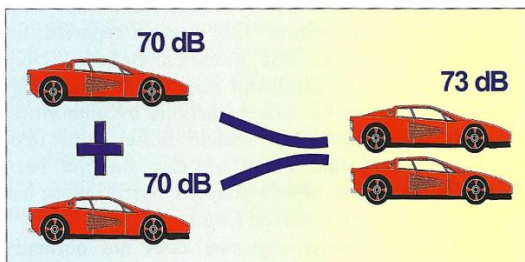


Fonte: Hanson *et al.* (2004).

Os níveis de pressão sonora são geralmente medidos em uma escala logarítmica. Com isso, a soma de duas fontes com a mesma pressão sonora não irá dobrar a pressão (GERGES & ARENAS, 2010).

A Figura 2.7 mostra os efeitos da adição do ruído e a equação 2.5, o cálculo para a soma de fontes com mesma pressão sonora:

Figura 2.7 - Efeito da adição de fontes de ruído



Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

$$dB(A)_t = 10 \log \left[10^{\frac{\{dB(A)_1\}}{10}} + 10^{\frac{\{dB(A)_2\}}{10}} + \dots + 10^{\frac{\{dB(A)_n\}}{10}} \right] \quad (2.5)$$

onde:

- dB(A)_t: nível de pressão sonora total;
- dB(A)_i: nível de pressão sonora de fonte individual.

Entretanto, quando são somados níveis de pressão sonora diferentes em dB, a soma é calculada através das equações 2.6 e 2.7. (GERGES & ARENAS, 2010).

$$\Delta L = 10 \log \left[1 + 10^{\left(\frac{L_1 - L_2}{10} \right)} \right] \quad (2.6)$$

$$NPS = L_1 + \Delta L \quad (2.7)$$

onde:

- L_1 : nível de pressão sonora da fonte do primeiro ponto de interesse, em dB(A);
- L_2 : nível de pressão sonora da fonte do segundo ponto de interesse, em dB(A);
- ΔL : diferença entre os níveis de pressão L_1 e L_2 sendo $L_1 > L_2$, em dB(A);
- NPS: nível de pressão total, em dB(A).

2.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DO RUÍDO DO TRÁFEGO

São diversos os mecanismos de geração e propagação do ruído gerado pelo tráfego. O ruído do motor (unidade de potência) e o ruído da interação pneu-pavimento oferecem contribuições diferentes para a emissão de ruído global. Para baixas velocidades, é o ruído do motor que se sobressai e tem a maior ou total parcela de contribuição para ruído global. Entretanto, para altas velocidades o ruído gerado pela interação pneu-pavimento se torna a fonte dominante na geração do ruído global (NELSON e PHILLIPS, 1994).

De acordo com Bendtsen e Andersen (2005), para velocidades acima dos 40 km/h, o ruído pneu-pavimento é a fonte de ruído dominante, enquanto que o ruído do motor exerce pouca ou nenhuma influência sobre o ruído total emitido pelo veículo.

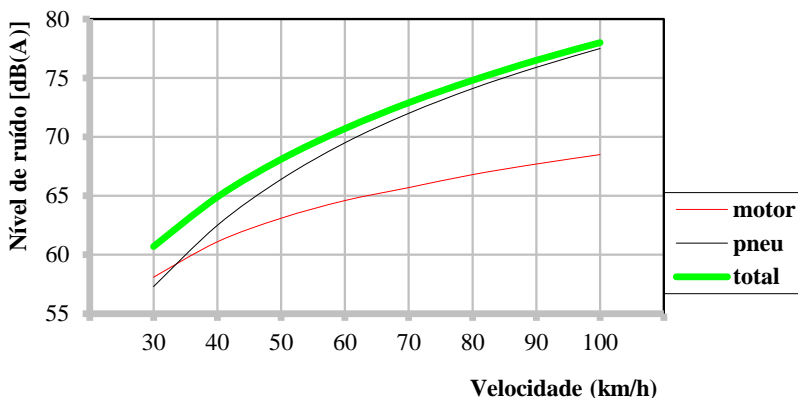
A velocidade em que o ruído pneu-pavimento passa a ser dominante varia de acordo com o tipo da frota de veículos. Na Holanda, por exemplo, estudos apontam que essa velocidade já é menor de 40 km/h como mostra a Figura 2.8.

Com o avanço da tecnologia, os motores estão mais silenciosos ao ponto que, em futuro próximo, apenas o ruído gerado pela interação pneu-pavimento será relevante para qualquer velocidade.

Segundo Ejsmont (1997), os mecanismos de geração e propagação do ruído provocado pela interação pneu-pavimento podem ser agrupados em dois grupos: os estruturais, chamados “structure borne”, que estão relacionados com as vibrações mecânicas que ocorrem no pneu; e o “air borne”, que está relacionado com os fenômenos aerodinâmicos.

Os mecanismos de geração de ruído da interação pneu-pavimento são divididos em dois tipos principais: a) impactos e choques, que ocorrem nas baixas frequências, abaixo de 1000 Hz e pertence ao grupo dos mecanismos mecânicos “structure borne”; b) bombeamento do ar, que ocorre em frequências acima de 1000 Hz e está inserido no grupo dos mecanismos aerodinâmicos “airborne” (FEHRL, 2006).

Figura 2.8 - Velocidade de cruzamento quando o ruído pneu-pavimento é dominante.



Fonte: Palestra realizada na UFSC pelo Dr. Wim van Keulen (2011).

2.2.1 Mecanismos de Geração Mecânica

Os mecanismos mecânicos são divididos em dois grupos: a) mecanismos de impactos; b) mecanismos de adesão. O Quadro 2.2 mostra o resumo desses dois mecanismos, enquanto que as Figuras 2.9 e 2.10 ilustram cada um dos mecanismos (SANDBERG & EJSMONT, 2002).

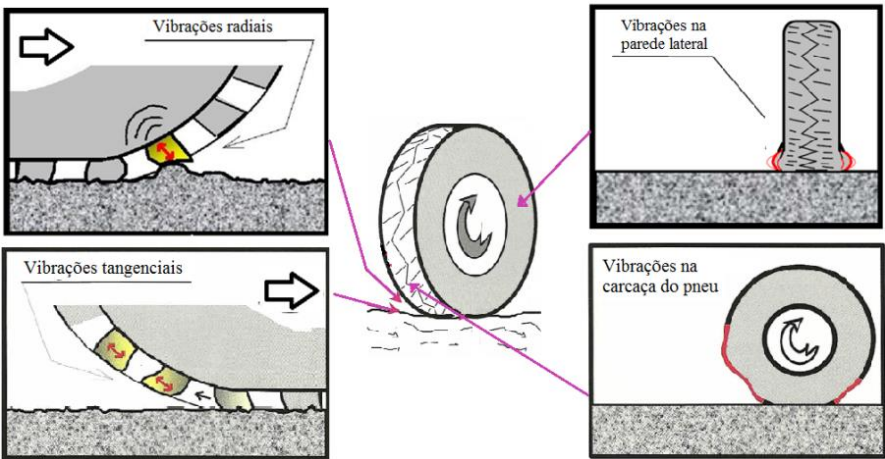
O principal mecanismo de geração mecânica do ruído são os impactos e os choques, os quais estão diretamente relacionados com a textura da superfície do pavimento. O ruído mecânico é gerado principalmente por vibrações radiais que são ativadas pela textura do revestimento que deformam os blocos da banda de rolagem do pneu. Podem ser vistas como centenas ou mesmo milhares de pequenos golpes de martelo que ocorrem a cada segundo (RASMUSSEN *et al.*, 2007 e FEHRL, 2006).

Quadro 2.2 - Mecanismos de geração mecânica.

Mecanismos de Geração Mecânica	Mecanismos de Impactos	Vibrações radiais e tangenciais do pneu (impactos e choques): Causadas pelas interações resultantes entre os blocos da banda de rolagem do pneu e a superfície do pavimento. São ativadas pelos elementos de rugosidade do revestimento que deformam os blocos da banda de rolagem do pneu. As vibrações do pneu são nas direções radiais e tangenciais, espalhando-se pelas paredes laterais do pneu.
		Vibrações da carcaça do pneu: Ruído gerado pela carcaça dos pneus transmitidos pelas deformações da banda de rodagem do pneu.
	Mecanismos de Adesão	Vibrações do tipo adere/desliza (“stick-slip”): Como em um jogo de basquete, quando o som característico do deslizamento do tênis pode ser ouvido. Esse mesmo tipo de som é o movimento relativo entre a banda rolagem e a superfície do pavimento.
		Vibrações do tipo adere/descola (“stick-snap”): Proporcionado pelo contato entre banda de rolagem e a superfície do pavimento, causando uma adesão entre esses. Logo após a adesão, ocorre a liberação do bloco da banda de rolagem, gerando vibrações radiais e tangenciais.

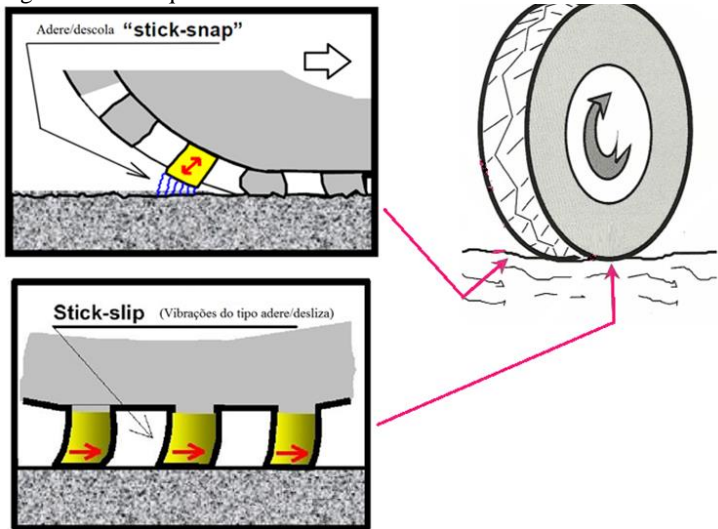
Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

Figura 2.9 - Esquema ilustrativo dos mecanismos mecânicos de impactos.



Fonte: Adaptado de Sandberg & Ejsmont (2002).

Figura 2.10 - Esquema ilustrativo dos mecanismos mecânicos de adesão.



Fonte: Adaptado de Bernhard & Wayson (2005); Sandberg & Ejsmont (2002).

2.2.2 Mecanismos de Geração Aerodinâmica

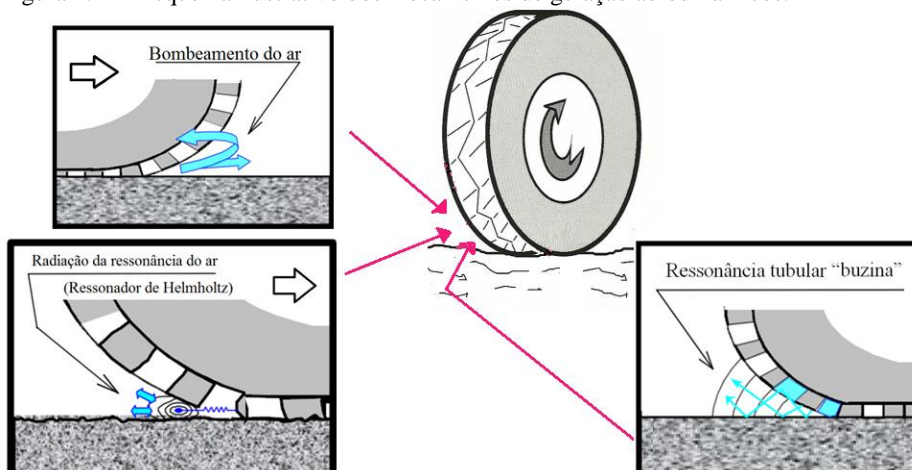
Os mecanismos de geração aerodinâmica do ruído são derivados, principalmente, pela movimentação do ar entre a estrutura do pneu e a superfície do pavimento. Esse mecanismo está ligado diretamente com a porosidade do revestimento asfáltico. Quando essa porosidade existe, os efeitos desses mecanismos aerodinâmicos são mitigados (SANTOS, 2007). O Quadro 2.3 mostra o resumo dos mecanismos aerodinâmicos e a Figura 2.11 ilustra esses mecanismos.

Quadro 2.3 - Mecanismos de geração aerodinâmicos.

Mecanismos de Geração Aerodinâmica	Bombeamento do ar: é ocasionado quando o ar passa pelos sulcos do pneu e é bombeado para dentro e comprimido para fora destas passagens, gerando assim o ruído.
	A radiação da ressonância do ar: conhecido como ressonador de Helmholtz. Esse fenômeno ocorre quando o ar passa por uma cavidade e, devido a isso, ele ressoa. Acontece na extremidade traseira do pneu e está associado a uma faixa de frequência entre 1000 a 2000 Hz.
	Ressonância tubular (efeito “buzina”): o som é amplificado pela geometria da superfície do pneu e da rodovia gerando múltiplas reflexões.

Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

Figura 2.11 - Esquema ilustrativo dos mecanismos de geração aerodinâmicos.



Fonte: Adaptado de Rasmussen *et al.* (2007).

Dentre os mecanismos de geração aerodinâmica, o principal deles é o de bombeamento do ar. Com o deslocamento do veículo o ar passa pelos sulcos do pneu sendo sugado e expulso por milhares de vezes por segundo. O ruído gerado por esse mecanismo é semelhante ao assobiar, em que o ar é forçado a sair por uma pequena abertura (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

2.3 ABSORÇÃO SONORA

2.3.1 Absorção sonora na mistura asfáltica

A absorção sonora é definida como a relação entre a energia sonora absorvida e a energia sonora incidente (CARVALHO, 2011). Representa a capacidade da superfície de não refletir a energia acústica incidente. Geralmente, para determinar a absorção sonora dos materiais, o ensaio realizado é o do tubo de impedância (vide item 2.3.2).

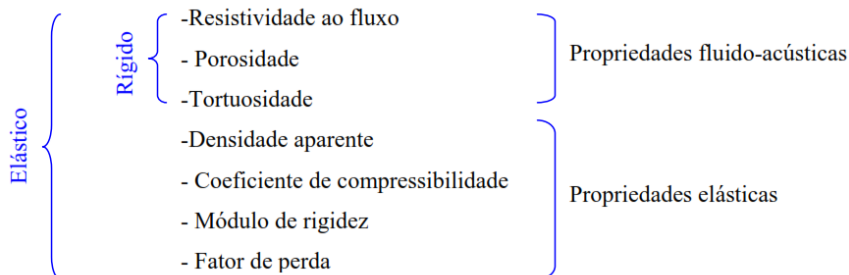
Misturas asfálticas acusticamente absorventes, conhecidas como misturas porosas, têm a função principal de reduzir a amplificação devido ao efeito dos mecanismos aerodinâmicos e, desta forma, reduzir a radiação do som (KROPP *et al.*, 2007).

É importante que os materiais porosos consigam proporcionar a passagem de um fluxo de ar, para que, desta forma, haja propagação das ondas sonoras dentro do material (GERGES & ARENAS, 2010).

O coeficiente de absorção α , que caracteriza a absorção sonora de um material, é sempre positivo e varia de 0 a 1. Para um $\alpha=1$ o material é considerado puramente absorvente e para $\alpha=0$ o material é puramente reflexivo (GERGES & ARENAS, 2010).

Uma síntese das principais propriedades utilizadas para caracterizar o comportamento acústico de cada tipo de material poroso é mostrada na Figura 2.12. Para vários materiais, a absorção sonora é fortemente dependente do conhecimento de todas essas propriedades. No entanto, para o material rígido, necessita-se apenas conhecer os parâmetros fluido-acústicos (LOPES, 2006).

Figura 2.12 - Parâmetros para materiais porosos.



Fonte: Lopes (2006).

A absorção sonora está diretamente relacionada às características internas do material, tais como a porosidade, tortuosidade ou resistividade do fluxo de ar estático (LUONG *et al.*, 2014).

A mistura asfáltica é considerada no modelo como um material poroso rígido. Com isso, o seu coeficiente de absorção sonora depende principalmente de três parâmetros: resistividade ao fluxo, porosidade e tortuosidade.

a) Resistividade ao fluxo de ar

A resistividade ao fluxo é o parâmetro mais importante para a absorção sonora. Ela é medida através da relação entre a vazão de ar escoando pela amostra e a diferença de pressão antes e após a mesma. A equação 2.8 mostra o cálculo da resistência ao fluxo (GERGES & ARENAS, 2010).

$$R_s = \frac{\Delta P}{\mu} \quad (2.8)$$

onde:

- R_s : é a resistividade específica ao fluxo de ar, em Ns/m^3 ;
- ΔP : é a diferença de pressão do ar medida nos dois lados de uma amostra de material na qual se força a passagem de ar, em N/m^2 ;
- μ : é a velocidade do ar normal à superfície da amostra, em m/s .

Por sua vez, a resistividade ao fluxo depende da espessura da amostra e por isso, divide-se a resistência ao fluxo pela espessura da amostra de acordo com a equação 2.9.

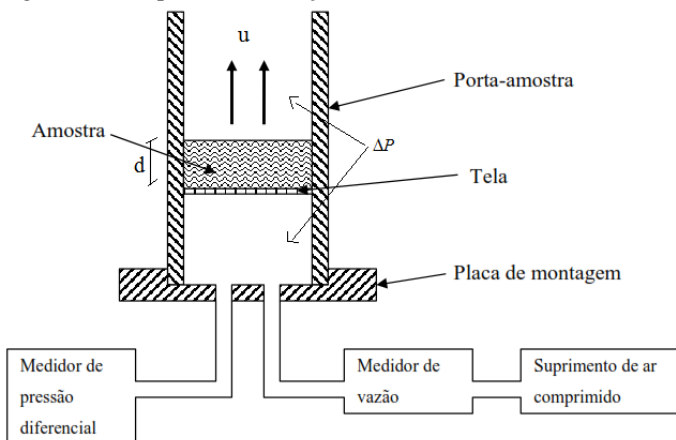
$$R = \frac{R_s}{d} \quad (2.9)$$

onde:

- R : resistividade de fluxo, em Ns/m^4 ;
- d : é a espessura da amostra de material, em m ;
- R_s : é a resistência ao fluxo de ar, em Ns/m^3 .

A medição é padronizada pela norma ASTM C 522. Ela descreve, principalmente, os cuidados que devem ser tomados durante as medições. A Figura 2.13 ilustra o aparato de medição.

Figura 2.13 - Aparato de medição da resistividade ao fluxo.



Fonte: ASTM C 522.

b) Porosidade

A porosidade é a razão de volume ocupado pelo fluido dentro dos poros e o volume total do material poroso. A porosidade η é calculada através da equação 2.10.

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.10)$$

onde:

- η : porosidade;
- V_v : é o volume de vazios da amostra;
- V_t : é o volume total da amostra.

c) Tortuosidade

A tortuosidade representa o tipo de percurso pelo qual o ar irá ultrapassar. A passagem de ar através da camada porosa será dependente da forma dos espaços vazios interligados (FEHRL, 2006).

As diferentes formas da estrutura interna, da densidade e da compressibilidade do material, são representadas por um coeficiente estrutural (GERGES & ARENAS, 2010).

A tortuosidade pode ser definida como uma medida do desvio do ângulo do eixo dos poros em relação ao eixo de propagação interna da onda no meio (BOLTON E KANG, 1997).

Existem técnicas que utilizam o ultrassom para estimar de forma indireta a tortuosidade. Estas técnicas baseiam-se em modelos de material poroso rígido. As propriedades são estimadas indiretamente através de um ajuste ao modelo teórico. A tortuosidade é representada, geralmente, pela letra grega χ (Qui) e pode ser quantificada experimentalmente variando entre 2 a 5 (BOLTON E KANG, 1997). Quanto mais tortuoso for o percurso do ar, menor é a frequência onde se encontra o pico de absorção sonora do material.

2.3.2 Tubo de impedância

Um dos métodos mais utilizados para a determinação do coeficiente de absorção sonora de misturas asfálticas é o método do tubo de impedância. O ensaio é prescrito nas normas ASTM E 1050 (ASTM, 2008) e ISO 10534-2 E (ISO, 1998).

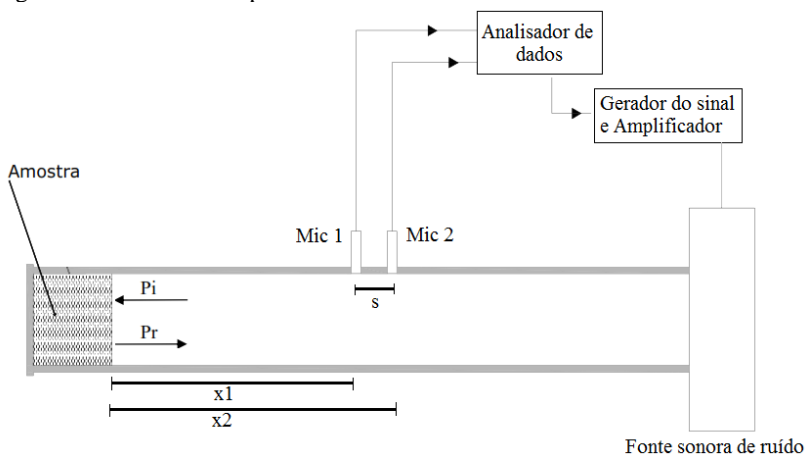
O princípio de operação do tubo de impedância é baseado na interação de duas ondas planas, sendo uma incidente e uma refletida (GIESBRECHT, 2007).

O equipamento consiste em uma fonte sonora que gera ondas planas as quais proporcionam a formação de ondas estacionárias no interior de um tubo em que a pressão sonora da onda estacionária é captada por dois microfones colocados em duas posições fixas pré-estabelecidas (GERGES & ARENAS, 2010).

Para o cálculo da absorção sonora, é utilizado o método da função de transferência. Os sinais obtidos são processados por um analisador digital de frequências, de dois canais, em que é calculado o coeficiente de reflexão, com o qual se determina o coeficiente de absorção sonora e a impedância acústica específica normal à superfície (LOPES, 2006).

Considerando uma onda sonora plana incidente normalmente em uma amostra colocada no extremo do tubo de impedância (Figura 2.14).

Figura 2.14 - Tubo de impedância.



Fonte: Crockers & Hanson (2004).

A pressão sonora nos pontos 1 e 2 são dadas pelas equações 2.11 e 2.12, sendo 1 e 2 as posições do microfone, e P_i e P_r as pressões incidentes e refletidas. As variações no tempo são simplificadas por $e^{j\omega t}$ que indicam a frequência angular da onda sonora e k é o número de onda (ISO, 1998).

$$p_1 = P_i \cdot e^{j(kx_1 - \omega t)} + P_r \cdot e^{-j(kx_1 - \omega t)} \quad (2.11)$$

$$p_2 = P_i \cdot e^{j(kx_2 - \omega t)} + P_r \cdot e^{-j(kx_2 - \omega t)} \quad (2.12)$$

Para cada posição do microfone é calculada a função transferência de acordo com a equação 2.13 (ISO, 1998).

$$H_i = \frac{P_i \cdot e^{j(kx_1 - \omega t)}}{P_i \cdot e^{j(kx_2 - \omega t)}} = e^{-jk(x_2 - x_1)} = e^{-jks} \quad (2.13)$$

$$H_r = \frac{P_r \cdot e^{-j(kx_1 - \omega t)}}{P_r \cdot e^{-j(kx_2 - \omega t)}} = e^{jk(x_2 - x_1)} = e^{jks}$$

onde:

- H_i : função transferência para pressão incidente;
- H_r : função transferência para pressão refletida;
- x_1 : distância da amostra ao microfone mais próximo;
- x_2 : distância da amostra ao microfone mais afastado;
- S : distância entre os dois microfones.

Em seguida, para o cálculo da reflexão sonora é utilizada a equação 2.14, em que H_{12} é a função transferência determinada pela razão entre os campos de pressão nas posições 1 e 2 obtida com a equação 2.15.

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{2jkx_1} \quad (2.14)$$

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \quad (2.15)$$

O valor de H_{12} é encontrado a partir das medições experimentais que determinam as funções transferência entre o sinal do alto-falante e do microfone nas posições 1 e 2. Por fim, é calculado o coeficiente de absorção sonora através da equação 2.16.

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.16)$$

onde:

- α : Coeficiente de absorção sonora;
- r : coeficiente de reflexão sonora.

As ondas planas em um tubo de impedância existem apenas abaixo da frequência de corte. A frequência de corte para o primeiro modo em dutos é dada pela equação 2.17. Acima da frequência de corte as ondas sonoras se propagam como ondas laterais ou cilíndricas (GERGES & ARENAS, 2010).

$$f_c = \frac{0,58 \times c}{d} \quad (2.17)$$

onde:

- f_c : frequência de corte (abaixo dela só atuam ondas planas);
- c : é velocidade do som no ar à temperatura de 20° C, em m/s;
- d : é o diâmetro do tubo a ser utilizado, em m.

Com o objetivo de minimizar os erros na medição da função transferência, os melhores resultados do coeficiente de absorção sonora numa determinada faixa de frequência, depende da distância 's' entre os microfones e pode ser calculada pela equação 2.18. A distância escolhida para os microfones deverá ser de acordo com a equação 2.19. Em que, f_m é a frequência máxima de interesse.

$$\frac{0,1c}{2s} \leq f \leq \frac{0,8c}{2s} \quad (2.18)$$

onde:

- c : é a velocidade do som no ar a 20°C, que é de 343 m/s;
- s : é a distância entre os centros dos furos nos quais serão posicionados os microfones.

$$s \leq \frac{c}{2f_m} \quad (2.19)$$

2.3.3 Impedância acústica

Impedância acústica (Z) é definida como a razão entre a pressão sonora (P) atuando na superfície da amostra e a velocidade de partícula (u) naquela superfície. É caracterizada como um número complexo contendo uma parte real e outra imaginária. A equação 2.20 expressa esta relação.

$$\tilde{Z} = \frac{\tilde{P}}{\tilde{u}} \quad (2.20)$$

onde:

- Z: é a impedância acústica específica, em kg/m²s;
- P: é a pressão acústica no meio (para ondas planas se propagando no sentido positivo de x);
- u: é a velocidade de vibração da partícula (para ondas planas se propagando no sentido positivo de x).

A impedância acústica de superfície (Z) é uma grandeza física que descreve a capacidade do material de absorver ou rejeitar a energia do som. Quando um material tem grande impedância acústica quer dizer que esse material tem uma baixa velocidade de propagação do som (FEHRL, 2006). O termo impedância significa que impede o movimento.

A impedância acústica Z de um material também pode ser expressa através da equação 2.21.

$$Z = \rho \times c \quad (2.21)$$

onde:

- Z: é a impedância acústica específica de valor real (para ondas planas), em kg/m²s;
- ρ: é a densidade do material, medida em kg/m³;
- c: é a velocidade do som no meio, medida em m/s.

Para que o som consiga se propagar de um meio para outro é necessário que as impedâncias desses meios sejam parecidas. Por exemplo, em condições normais, (temperatura de 20 °C, densidade ρ = 1,21 kg/m³ e velocidade do som c = 343 m/s) a impedância característica do ar, aplicando-se a equação 2.21, é 415,03 kg/m²s e da água, o valor sobe para 1,5 x10⁶ kg/m²s. Essa grande diferença entre as duas impedâncias gera um coeficiente de reflexão de 0,9988 e de transmissão de 0,0011.

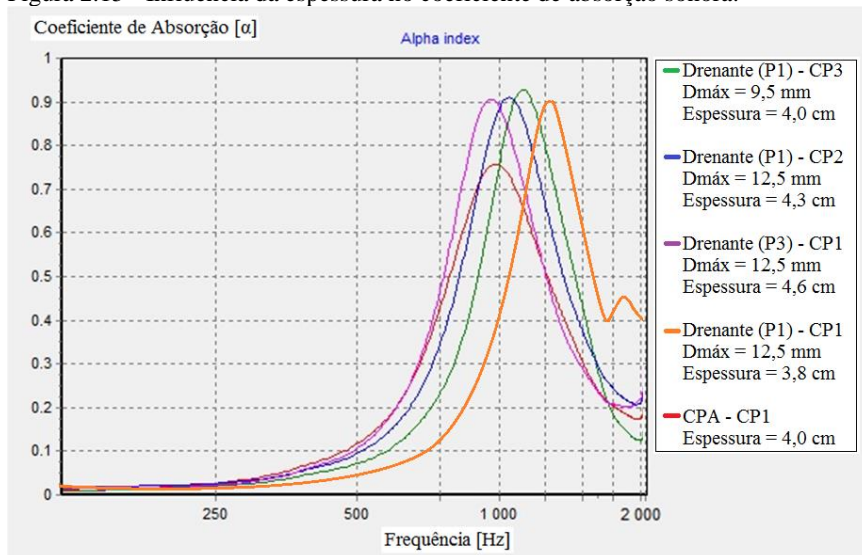
2.3.4 Medições da absorção sonora nas misturas asfálticas

A absorção sonora de superfícies de pavimentos é afetada pela espessura da camada porosa do revestimento, da porcentagem dos vazios de ar e de vazios comunicantes. Para uma mistura asfáltica densa comum, com 4 a 6% de volume de vazios, o coeficiente de absorção sonora será

de 0,1 a 0,2. Para misturas porosas, com porcentagem de volume de vazios em torno de 15%, o coeficiente de absorção sonora ficará entre 0,4 a 0,7. (HANSON *et al.*, 2005).

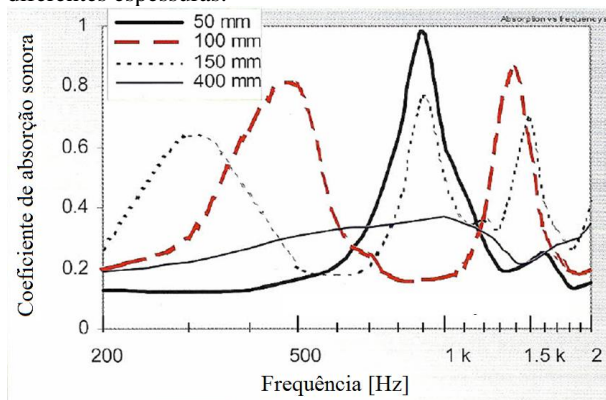
As Figuras 2.15 e 2.16 mostram que as espessuras do revestimento determinam onde ocorrem os picos de absorção sonora de uma mistura asfáltica (SANDBERG & EJSMONT, 2002; KNABBEN, 2012). Com isso, é possível otimizar o coeficiente de absorção sonora na frequência desejada através da variação da espessura do material utilizado para mitigar o ruído.

Figura 2.15 - Influência da espessura no coeficiente de absorção sonora.



Fonte: Knabben (2012).

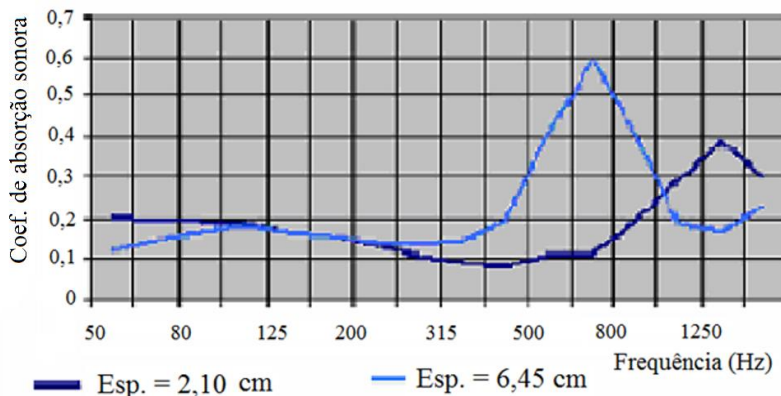
Figura 2.16 - Coeficiente de absorção sonora para revestimentos porosos com diferentes espessuras.



Fonte: Hamet *et al.* (1990 *apud* SANDBERG & EJSMONT, 2002).

Láo (2004) também realizou ensaios de absorção sonora com o tubo de impedância em diferentes revestimentos asfálticos. É possível notar, mais uma vez, a influência da espessura do revestimento na posição do pico de absorção sonora. A Figura 2.17 mostra os resultados do ensaio.

Figura 2.17 - Coeficientes de absorção sonora obtidos em corpos de prova de espessuras diferentes, da mistura tipo CPA (camada porosa de atrito).

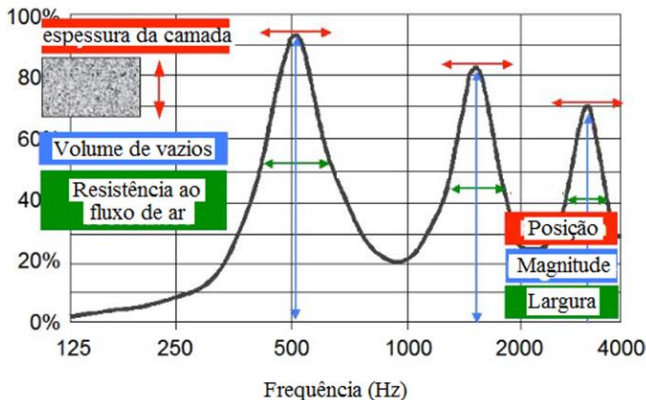


Fonte: Láo (2004).

As características da curva de absorção sonora são fortemente dependentes dos parâmetros da mistura asfáltica. A espessura do revestimento asfáltico determina a posição do pico de absorção sonora. Já

a magnitude do coeficiente de absorção sonora é determinada pela porosidade do material. Por sua vez a largura da base da curva é afetada pela resistência ao fluxo do ar. A Figura 2.18 ilustra essas características (KROPP *et al.*, 2007).

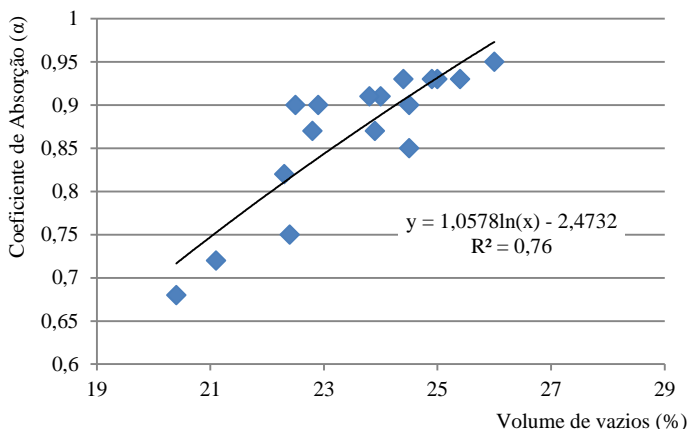
Figura 2.18 - Influência dos diferentes parâmetros na curva de absorção sonora.



Fonte: Kropp *et al.* (2007).

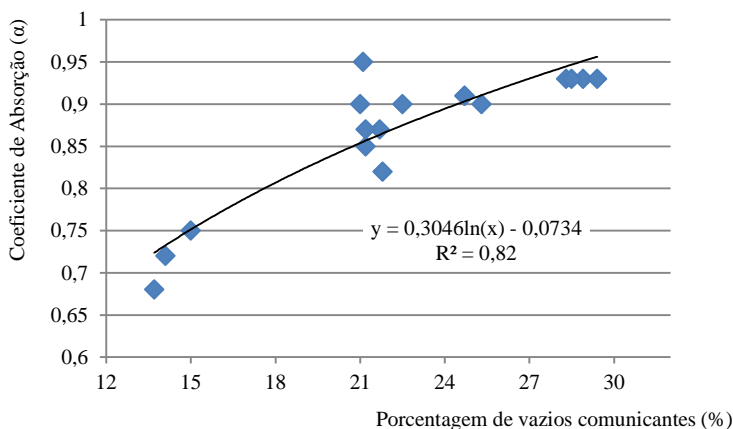
Knabben (2012), mostrou que a porcentagem do volume de vazios e dos vazios comunicantes das misturas asfálticas influenciam diretamente no valor do pico do coeficiente de absorção sonora de acordo com as Figuras 2.19 e 2.20. Para todas as misturas estudadas os valores do pico de absorção sonora ficaram entre as frequências de 900 a 1200 Hz. Os resultados mostram que quanto maior a porcentagem do volume de vazios e de vazios comunicantes, maior é o coeficiente de absorção sonora da mistura.

Figura 2.19 - Correlação entre o coeficiente de absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios da mistura.



Fonte: Knabben (2012).

Figura 2.20 - Correlação entre o coeficiente de absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios comunicantes da mistura.

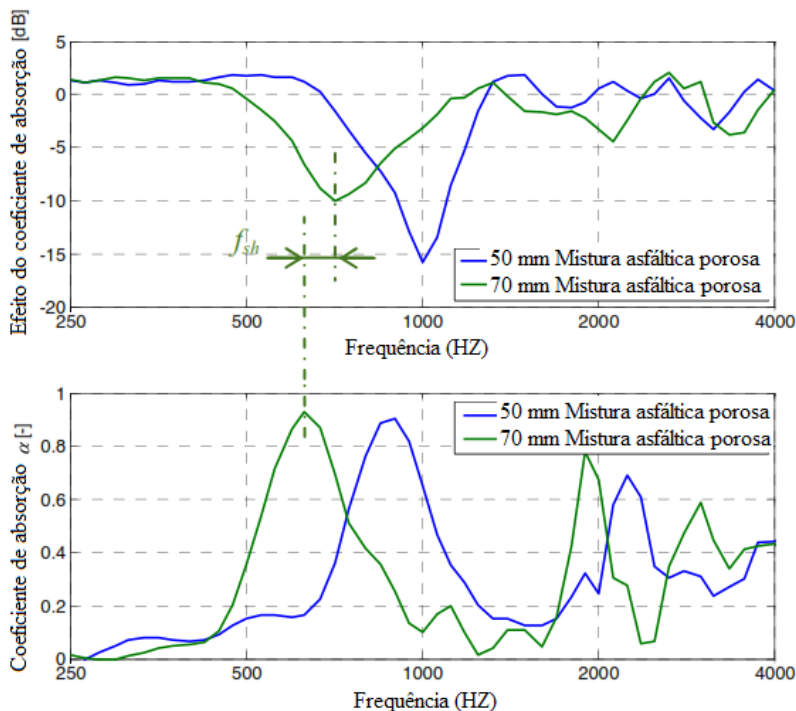


Fonte: Knabben (2012).

Peeters e Kuijpers (2008), verificaram a influência do coeficiente de absorção sonora na redução do nível de pressão sonora. Foram realizados ensaios de absorção sonora com o tubo de impedância e do nível de pressão sonora em campo para duas misturas asfáltica porosas. A Figura 2.21 mostra os resultados.

Observa-se, na Figura 2.21, que para um pico de absorção sonora em torno da frequência de 1000 Hz, a redução do ruído foi maior do que a amostra com pico de absorção sonora em uma frequência menor, em torno de 600 Hz.

Figura 2.21 - Influência da absorção sonora na redução do ruído pneu-pavimento.



Fonte: Peeters & Kuijpers (2008)

O ensaio com tubo de impedância é considerado por diversos autores a forma mais usual de verificar a absorção sonora do material. No entanto existem outras formas de verificar o coeficiente de absorção sonora (LANOYE *et al.*, 2006).

Li *et al.* (2014) utilizaram um aparato que emprega a tecnologia do campo livre em que a pressão sonora e a velocidade de partícula são registradas. O sensor de velocidade de partícula é colocado perto do microfone e com isso é possível calcular a impedância acústica diretamente em campo livre. O método utiliza a hipótese de que ao redor do receptor, apenas ondas planas se propagam. O dispositivo é chamado

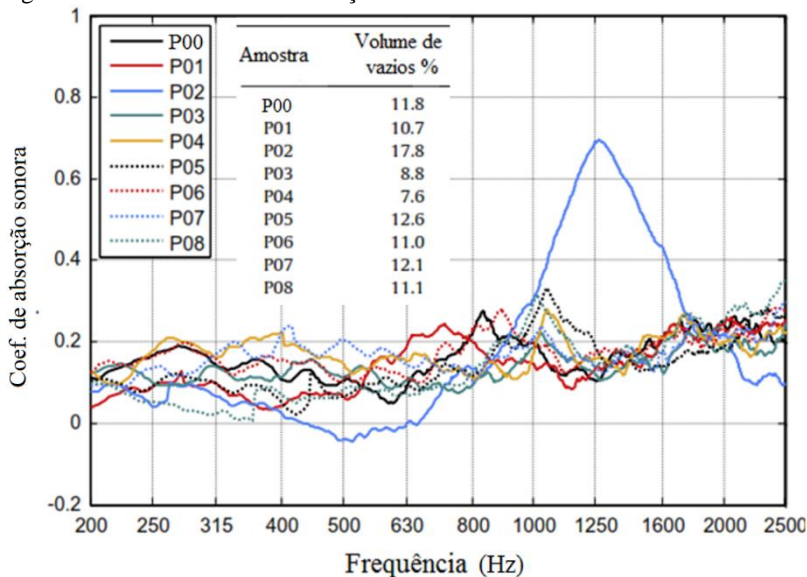
de Surface Impedance Setup (Figura 2.22) e foi projetado pela Microflown Technologies, da Holanda. A Figura 2.23 mostra o resultado da absorção sonora para diferentes tipos de amostras de misturas asfálticas.

Figura 2.22 - Aparato para medição do coeficiente de absorção sonora.



Fonte: Li *et al.* (2014).

Figura 2.23 - Coeficiente de absorção sonora de diferentes amostras.



Fonte: Li *et al.* (2014).

2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO

Existem diversos métodos de avaliação do ruído externo gerado pela interação pneu-pavimento. Os principais são os seguintes:

- Método estatístico de passagem (SPB);
- Método da estrada proximidade (CPX);
- Método da passagem controlada (CPB);
- Método Coast-By (CB) /Método do motor desligado;
- Método de laboratório do tambor (Drum-DR).

Dentre estes métodos, o mais utilizado em todo o mundo é método da estrada proximidade, mais conhecido por Close Proximity Method (CPX). O Quadro 2.4 apresenta uma breve descrição dos principais métodos de medição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento, enquanto que as Figuras 2.24, 2.25, 2.26 e 2.27, ilustram os métodos de avaliação do ruído pneu-pavimento.

Quadro 2.4 - Resumo dos métodos de medição do ruído pneu-pavimento.

Método	Descrição do Ensaio	Norma
SPB	Consiste em medir a maior pressão sonora (com filtro ponderador tipo A) de veículos individuais que estão passando por um ponto de referência na rodovia, assim como a sua velocidade. O nível sonoro máximo é medido a 7,5 m do centro da faixa de rolamento e a 1,2 m de altura em relação ao nível da rodovia.	ISO 11819-1 (1997)
CPX	Mede os níveis de pressão sonora utilizando um trailer especialmente projetado em que os microfones são posicionados junto aos pneus do trailer.	ISO 11819-2 (2010)
CPB	São escolhidos dois veículos de ensaio. Cada veículo desloca-se à velocidade constante com o motor em condições normais e é efetuada a medição do respectivo nível sonoro máximo, a 7,5 m da via.	NF S31-119-2 (2000)
CB	Tem as mesmas características do método da passagem controlada (CPB). No entanto, neste caso, a passagem do veículo de ensaio ocorre com o motor desligado com o veículo em ponto morto.	ISO 13325 (2003)
DR	O equipamento consiste em um cilindro de aproximadamente 3,60 metros de diâmetro, que contém as amostras de superfície do revestimento de 1/6 do diâmetro do cilindro.	-

Fonte: Adaptado de Sandberg & Ejsmont (2002).

Figura 2.24 - Medida do ruído pelo método estatístico de passagem (SPB).



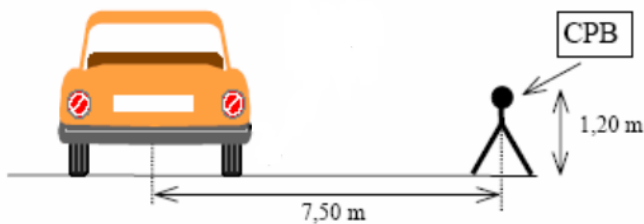
Fonte: Ceratti *et al.* (2009).

Figura 2.25 - Equipamento de ensaio do método CPX.



Fonte: Bueno *et al.* (2011).

Figura 2.26 - Método da Passagem Controlada (CPB).



Fonte: Lédée (2006).

Figura 2.27 - (a) Método Coast-By (LÁO, 2004) / (b) Método do tambor.



(a)

(b)

Fonte: Specht *et al.* (2009).

2.4.1 Close Proximity Method - CPX (Método da estrita proximidade)

O método Close Proximity (CPX) é proposto pela ISO 11819-2 (ISO, 2010) e tem como objetivo avaliar o ruído gerado pela interação pneu-pavimento para diferentes tipos de revestimentos de pavimento (LICITRA *et al.*, 2014).

Para a medida dos níveis de pressão sonora emitidos pelo contato pneu-pavimento é utilizado um trailer especialmente projetado que simula

um eixo padrão de um veículo de passeio, em que microfones são instalados no interior do trailer, próximos aos pneus especiais, denominados de pneus de referência. O trailer possui uma cobertura para reduzir a incidência do vento e do ruído proveniente dos outros veículos. Isso permite que o ensaio possa ser realizado independentemente do volume de tráfego na via e possa medir apenas a influência do ruído pneu-pavimento (BUENO *et al.*, 2011). A norma ISO 11819-2 (ISO, 2010) define os requisitos para o trailer. A Figura 2.28 mostra o equipamento do método CPX (HANSON *et al.*, 2005).

Figura 2.28 - Equipamento de ensaio do método CPX.



Fonte: Hanson *et al.* (2005).

Inicialmente a norma ISO 11819-2:2000 previa a medição de ruído pneu-pavimento com um conjunto de quatro pneus de referência. No entanto, em um estudo realizado posteriormente conclui-se que os quatro pneus de referência já não eram necessários para a efetiva aplicação do método CPX. Com isso, foi proposta uma reformulação onde os pneus utilizados no trailer são especificados pela norma ISO 11819-3. Ao invés de quatro, são dois os pneus de referência (MORGAN *et al.*, 2009):

- ASTM SRTT;
- Avon AV4.

O pneu ASTM SRTT representa o ruído gerado pelos veículos leves, enquanto que o pneu Avon AV4 é o mais apropriado para representar o ruído gerado pelos caminhões. As dimensões do pneu ASTM SRTT é especificado pelo código 225/60R16 e do pneu Avon AV4 é o código 195R14C.

A Figura 2.29 mostra os pneus de referência utilizados no método CPX (BÜHLMANN *et al.*, 2013).

Figura 2.29 - Pneus de referência do trailer CPX: (a) ASTM SRTT e (b) Avon AV4.



Fonte: Bühlmann *et al.* (2013).

Com a finalidade de caracterizar acusticamente a superfície do pavimento, são calculados dois índices, sendo um para cada tipo de pneu de referência. O CPXP caracteriza o ruído provocado por veículos leves e seu cálculo é realizado com as medições do pneu de referência (a). O índice CPXH é calculado com as medições do pneu de referência (b) que caracteriza o ruído gerado pelos veículos pesados. Realizando-se a média das duas avaliações é determinado um "índice único" que constitui o resultado final. Esse índice é chamado de "Close-Proximidade Sound Index (CPXI)" e pode ser usado para comparação de superfícies de rodovias (NORMA ISO 11819-2: 2010).

Os índices CPXP e CPXH são calculados a partir dos dados individuais do L_{cpX} , que é a média do nível de pressão sonora calculada ao longo da seção de teste, a cada 20 metros para uma velocidade de referência (40, 50, 80 e 100 km/h) (NORMA ISO 11819-2: 2010).

O L_{cpX} é a soma energética dos níveis de pressão sonora dB(A) entre 315 e 5.000 Hz. A equação 2.22 mostra o cálculo do L_{cpX} .

$$L_{cpX_{t,w,r,i}} = 10 \cdot \log \left(\sum_{315}^{5000} 10^{0,1(L_{cpX_{t,w,r,i,f}})} \right) \quad (2.22)$$

onde:

- t: tipo de pneu;
- w: lado do pneu (direito ou esquerdo);
- r: número de ensaios;

- i: número do segmento;
- f: frequência (1/3 de oitava em Hz).

O cálculo do L_{cp} é realizado separadamente para o pneu do lado esquerdo e lado direito, onde em cada um é realizada a média dos dois microfones de acordo com a equação 2.23 para cada pneu de referência.

$$L'cp_{t,w,r,i,f} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{2} \sum_{m=M1}^{M2} 10^{0,1(Lcp_{t,w,r,i,f,m})} \right) \quad (2.23)$$

onde:

- M1: microfone 1;
- M2: microfone 2.

Posteriormente é realizada a correção dos dois valores do L_{cp} de cada pneu através da equação 2.24.

$$Lcp_{t,w,r,i,f} = L'cp_{t,w,r,i,f} - cdf_f \quad (2.24)$$

O cdf foi calculado no item 4.1.4 para verificar a influência da reflexão do som gerado pelos objetos perto dos microfones de medição. Em seguida é calculado o L_{cp} total para cada pneu através da equação já apresentada 2.22. Ainda é realizada a correção do L_{cp} para velocidade e temperatura de acordo com a equação 2.25.

$$Lcp_{t,v,w,r,i} = Lcp_{t,v,w,r,i} - B \cdot \log \left(\frac{v_{t,w,r,i}}{V} \right) + CT_t(20 - T_i) \quad (2.25)$$

onde:

- t: tipo de pneu;
- w: lado do pneu (direito ou esquerdo);
- v: velocidade do ensaio;
- V: velocidade de referência;
- i: número do segmento;
- r: número de ensaios;
- B: coeficiente de velocidade;
- T_i : temperatura do ensaio;
- CT_i : coeficiente de temperatura.

Por fim, o L_{cp} para cada tipo de pneu e para uma velocidade de referência é calculada através da equação 2.26.

$$L_{cp}x_{t,V} = \frac{1}{n_r} \sum_{r=1}^{n_r} \left(\frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \left(\frac{1}{2} \sum_{w=L,R} L_{cp}x_{t,w,r,i,V} \right) \right) \quad (2.26)$$

onde:

- t: tipo de pneu;
- w: lado do pneu (direito ou esquerdo);
- V: velocidade de referência;
- i: número do segmento;
- r: número de ensaios;
- L: pneu lado esquerdo;
- R: pneu lado direito.

Para o cálculo do CPXI, os dois valores de finais L_{cp} de cada pneu de referência é aplicada na equação 2.27.

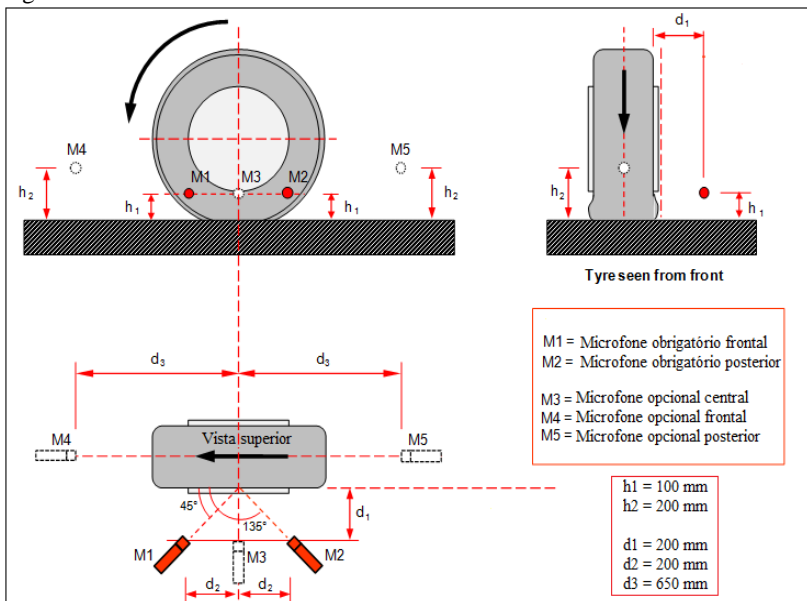
$$CPXI = 0,5.L_p + 0,5.L_H \quad (2.27)$$

onde:

- L_p : L_{cp} do pneu de referência dos veículos leves;
- L_H : L_{cp} do pneu de referência dos veículos pesados.

As seções de teste onde são realizadas as medições com o trailer CPX devem ter um comprimento de pelo menos 100 m, em que, como mencionado anteriormente, a cada 20 metros deverá ser gravada uma medição do L_{cp} para cada microfone. As medições são realizadas por dois microfones obrigatórios em cada pneu. A Figura 2.30 mostra as posições dos microfones.

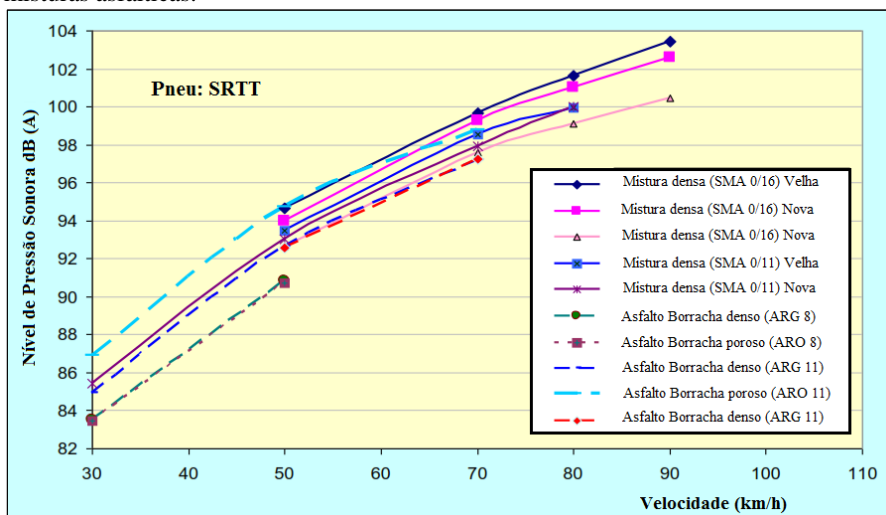
Figura 2.30 - Posicionamento dos microfones no Trailer-CPX.



Fonte: Norma ISO 11819-2: 2010.

Em um estudo realizado na Suécia em 2010, 4 revestimentos asfálticos com borracha foram comparados com 5 revestimentos asfálticos densos, de diferentes idades, utilizando o método do trailer CPX. A Figura 2.31 mostra os resultados da média do LcpX para o pneu de referência SRTT para diferentes velocidades (SANDBERG, 2010).

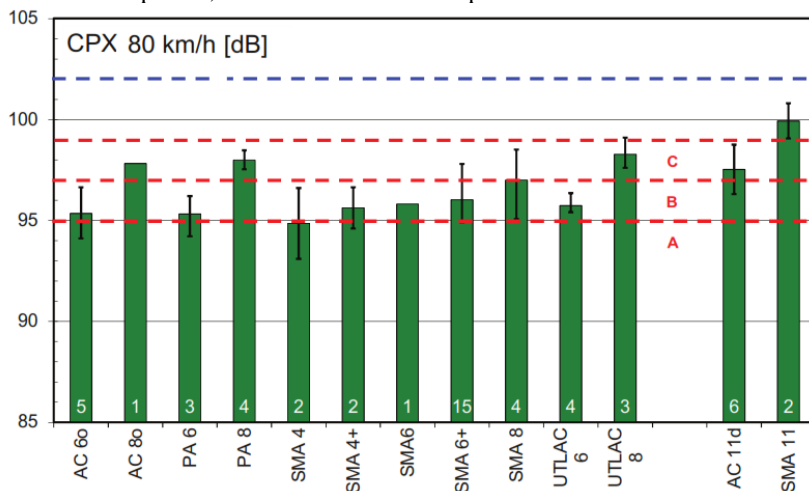
Figura 2.31 - Nível de pressão sonora medido com o trailer CPX para diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Sandberg (2010).

No centro de pesquisa de rodovias da Bélgica e no Instituto Nacional de pesquisa de Transporte e Rodovia da Suécia foram realizadas medições do nível de pressão sonora através do método do CPX para diferentes tipos de superfícies de pavimento (KRAGH *et al.*, 2012). A Figura 2.32 mostra os resultados encontrados.

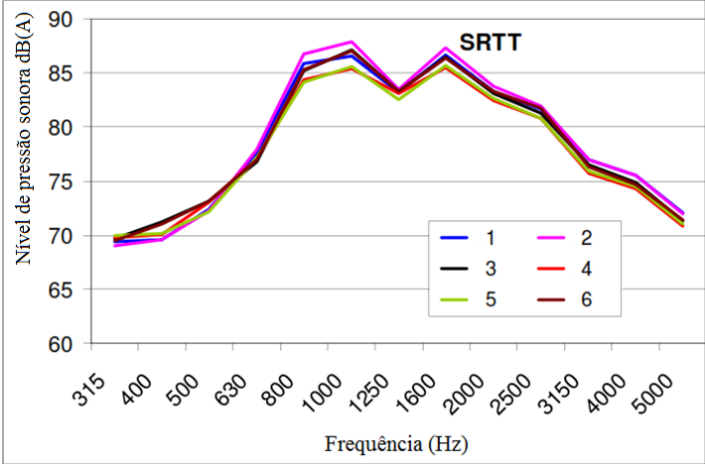
Figura 2.32 - Nível de pressão sonora pelo método do CPX para diferentes misturas asfáltica com velocidade de referência de 80 km/h: AC = Mistura densa; PA = Mistura porosa; UTLAC = Camada fina porosa.



Fonte: Krach *et al.* (2012).

Os resultados das medições do ruído pneu-pavimento utilizando o trailer CPX podem ser representados não só pelo valor do CPXI para cada velocidade de referência escolhida, mas também em função do espectro da frequência. A Figura 2.33 mostra a média do nível de pressão sonora dos dois microfones do Trailer CPX em função do espectro da frequência para o pneu de referência SRTT. O ensaio foi realizado em uma camada de revestimento poroso para seis pares do pneu, em que a velocidade das medições foi de 80 km/h.

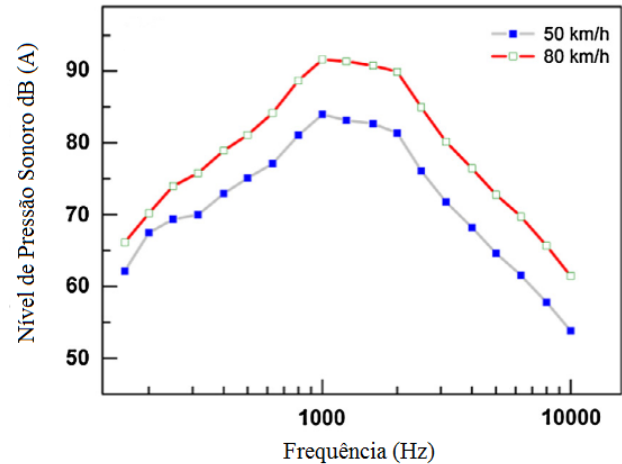
Figura 2.33 - Espectro do nível de pressão sonora do ensaio do Trailer CPX.



Fonte: Schwanem *et al.* (2008).

A Figura 2.34 mostra o nível de pressão sonora da interação pneu-pavimento medida com o trailer CPX em função do espectro da frequência em um revestimento asfáltico denso com borracha, com porcentagem de volume de vazios de 5,7%, localizado na Espanha (PAJE *et al.*, 2013).

Figura 2.34 - Espectro do nível de pressão sonora do ensaio do Trailer CPX para duas velocidades de referência.



Fonte: Paje *et al.* (2013).

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO GERADO PELA INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO

São diversos os fatores que influenciam o ruído gerado pela interação pneu-pavimento. O entendimento maior desses fatores permite que se possam buscar soluções conjuntas para minimizar a geração e propagação desse ruído. Os principais fatores são:

- Revestimento do pavimento (porosidade, textura, granulometria, rigidez e idade);
- Condições climáticas (temperatura e chuva);
- Veículos (modelo, pneus e velocidade).

2.5.1 Revestimento do Pavimento

Várias características do revestimento do pavimento influenciam o ruído gerado pela interação pneu-pavimento. Entre as principais estão: a porosidade da superfície e o tamanho máximo do agregado, o qual estão diretamente ligados com a granulometria da mistura.

Um revestimento de pavimento que conseguir reduzir em 3 dB(A) o ruído gerado pela interação pneu-pavimento em relação a um revestimento de referência (mistura asfáltica densa) é considerado um pavimento de baixo ruído (SANDBERG & EJSMONT, 2002; KRAGH *et al.*, 2012; WEBER e ODINK, 2013).

Entretanto, cada país adota um nível de ruído do revestimento de referência. Por exemplo, a superfície de referência alemã é 2,5 dB (A) mais ruidosa do que a holandesa (ELISABETE e PEREIRA, 2013).

Kragh *et al.* (2012), definiram 3 classes para revestimentos do pavimento de baixo ruído de acordo com a redução do nível de pressão sonora em relação ao revestimento de referência da Dinamarca. O Quadro 2.5 mostra as classes de redução do ruído.

Quadro 2.5 - Classes de redução do ruído dos revestimentos.

Velocidade (km/h)	Clase do revestimento	C	B	A
	CPX de referência (dBA)	Redução do ruído (dBA)	Alta redução do ruído (dBA)	Casos particulares de redução do ruído (dBA)
80	102	97 - 99	95 - 97	< 95
50	94	89 - 91	87 - 89	< 87

Fonte: Krach *et al.* (2012).

Segundo Sandberg & Ejsmont (2002), em 2002 para que se conseguisse um revestimento considerado de baixo ruído era necessário que:

- A mistura asfáltica porosa tivesse agregados de tamanho máximo entre 4 a 8 mm;
- A porosidade deveria ser tal que diminuísse a ocorrência de colmatção, ou que a mesma fosse retardada;
- A espessura da camada superficial estivesse em torno de 40 mm de espessura dependendo da granulometria, para se tivesse uma otimização da absorção sonora;
- Camada superficial deveria possuir uma alta porcentagem de vazios comunicantes. Esta porcentagem de vazios deveria ser de no mínimo de 20%, sendo o teor ideal entre 25 a 30%.

Atualmente essas são as principais diretrizes seguidas para o desenvolvimento de uma mistura de baixo ruído. No entanto, o último item citado acima, vem sendo questionado por alguns autores, já que ele diminui a vida útil do pavimento. Com isso, estudos apontam que um volume de vazios entre 10 e 15% já é considerado ideal na otimização da absorção sonora e da durabilidade do material (SANDBERG *et al.*, 2011; LI, 2013).

É necessário notar que o ruído gerado pela interação pneu pavimento é apenas uma das diversas características da mistura asfáltica que determina a sua escolha em uma estrutura do pavimento. O desempenho geral de uma mistura asfáltica também depende de outros parâmetros, tais como: resistência à derrapagem e durabilidade, que são, muitas vezes, mais importantes que o ruído e, na maioria dos casos, vão limitar a escolha do revestimento de baixo ruído (LI, 2013).

As misturas asfálticas com alta porosidade (porcentagem de volume de vazios entre 20% e 25%) são consideradas de alta absorção sonora. Entretanto, muitas vezes apresentam baixa durabilidade e envelhecimento precoce do ligante. A perda dos agregados por desagregação é um dos principais defeitos desse revestimento, a qual diminui significativamente a sua vida útil de serviço. Outro problema é o alto custo de manutenção devido, principalmente, a colmatção dos poros da mistura, que é a principal causa da diminuição da capacidade de absorção sonora desses revestimentos (DRI, 2007).

2.5.1.1 Porosidade do revestimento do pavimento

A porosidade do revestimento do pavimento está diretamente relacionada com a absorção sonora da superfície. A porosidade aumenta a absorção sonora, que é a capacidade de um material de absorver o som, e assim impedir que ele se reflita. O aumento da porosidade reduz o ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos da interação pneu-pavimento, principalmente de bombeamento do ar e, por consequência, reduz o ruído gerado pelo tráfego (FEHRL, 2006).

Quando se tem uma superfície porosa, o ar pode fluir pelo interior da mistura asfáltica e reduzir o fenômeno de bombeamento de ar gerado pela rolagem dos pneus. O resultado é a redução sensível do ruído gerado pelo acoplamento pneu-pavimento (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

O fenômeno do bombeamento de ar gera um ruído mais significativo nas frequências acima de 1000 Hz. Se a superfície do revestimento é porosa, os gradientes de pressão de ar são menores e esse ruído é reduzido (SANDBERG *et al.*, 2011).

A porosidade da superfície do pavimento pode diminuir os níveis de ruído na maior parte do espectro da frequência, sendo menos eficiente na frequência próxima aos 2500 Hz (LIAO *et al.*, 2014).

Para que o ar consiga fluir pela mistura asfáltica, e assim reduzir o ruído da interação pneu-pavimento, é necessário que haja comunicação entre seus poros. A norma AFNOR NF P 98 254-2/1993 prescreve o ensaio para o cálculo da porcentagem de vazios comunicante. Neste ensaio, é medida a quantidade de água que penetra no interior de um corpo de prova pela sua face superior enquanto que as faces, lateral e a inferior, são impermeabilizadas.

A porcentagem de vazios comunicantes é obtida através da equação 2.23 (AFNOR NF P 98-254-2, 1993):

$$V = \left(\frac{P_{ab}}{A_f \times h_{redu}} \right) \times 100 \quad (2.23)$$

onde:

- V: porcentagem de vazios comunicantes (%);
- P_{ab} : peso de água absorvida (g);
- A_f : área da face (cm^2);

- h_{redu} : altura reduzida (cm).

A altura reduzida é calculada pela equação 2.24

$$h_{\text{red}} = h_m - \left(\frac{D_{\text{máx}}}{20} \right) \quad (2.24)$$

onde:

- h_m : altura média do corpo de prova (cm);

- $D_{\text{máx}}$: diâmetro máximo do agregado.

A porosidade, juntamente com a porcentagem de vazios comunicantes, proporciona a percolação da água superficial proveniente das precipitações chuvosas, eliminando a lâmina de água existente na superfície, aumentando a aderência pneu-pavimento e reduzindo o spray gerado pelos veículos (OLIVEIRA, 2003).

No entanto, quanto maior a porosidade do revestimento, menor é a sua vida de serviço, não só pela diminuição da resistência, mas também por que os poros da superfície tendem a colmatar com o tempo. Desta forma, a porosidade deve ser otimizada para que se encontre um equilíbrio entre esses parâmetros (SANDBERG *et al.*, 2011). Na Holanda, estudos mostram que uma porcentagem de vazios entre 10 e 14% já seria suficiente para uma redução significativa do ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos. Essas misturas teriam uma maior vida de serviço em relação às misturas asfálticas porosas com maiores porcentagens de vazios (entre 25 e 30%) (LI *et al.*, 2014).

A porcentagem de vazios comunicantes pode ser avaliada através do ensaio de drenabilidade. São inúmeros os modelos de drenômetros que avaliam a drenabilidade das misturas asfálticas em campo ou laboratório. A equação 2.25 mostra o cálculo do ensaio utilizando um drenômetro espanhol desenvolvido na Universidade de Cantábria (NLT-327/00)

$$\ln K = 7,624 - 1,348 \ln T \quad (2.25)$$

onde:

- K: drenabilidade em (cm/s).10⁻²;

- T: é o tempo necessário para passar pelo corpo de prova o volume de água padronizado, em segundos.

Nos Estados Unidos o ensaio de drenabilidade é realizado de acordo com a norma ASTM E 2380. A Figura 2.35 mostra o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 2.35 - Equipamento de drenabilidade.



Fonte: NCHRP (2009).

2.5.1.2 Textura superficial do pavimento

A textura do pavimento é um dos parâmetros mais importantes que influencia o ruído gerado pelo tráfego. Está diretamente relacionada com as vibrações causadas no pneu durante a sua rolagem.

A textura da superfície do revestimento pode ser descrita na forma de uma senóide. Foram determinados intervalos de comprimentos de onda da textura da superfície (PIARC, 1991):

- Microtextura: $\lambda < 0,5 \text{ mm}$;
- Macrotextura: $0,5 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$;
- MegaTextura: $50 \text{ mm} < \lambda < 500 \text{ mm}$;
- Irregularidade: $\lambda > 500 \text{ mm}$.

O Quadro 2.6 resume cada uma das classificações.

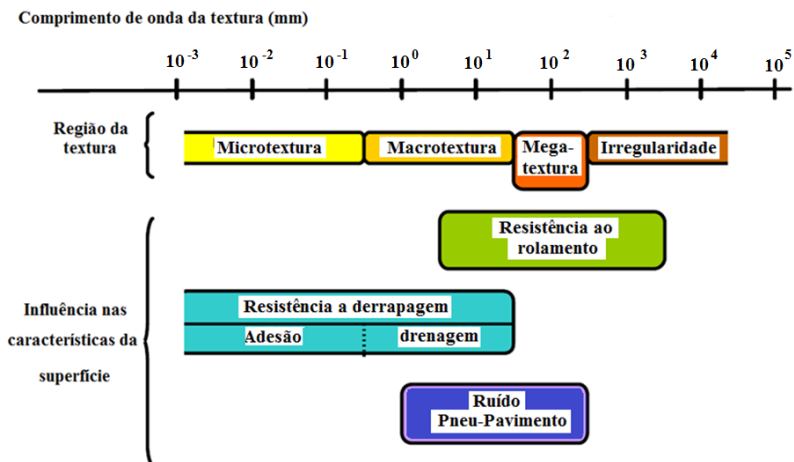
Quadro 2.6 - Resumo da classificação da textura.

Textura	Comprimento de onda	Amplitude típica dos picos	Descrição
Microtextura	< 0,5mm	0,001-0,5mm	É muito pequena para ser observada a olho nú e indica uma superfície do agregado áspera capaz de interagir com a banda de rodagem do pneu, rompendo o filme de água do contato do pneu com o pavimento.
Macrotextura	0,5-50mm	0,1-20mm	A macrotextura é função da altura dos agregados salientes à superfície do pavimento e da sua distribuição. Tem a função primordial de evacuar a água da área de contato para que a microtextura possa atuar.
Megatextura	50-500mm	0,1-50mm	É a grande responsável pelas vibrações radiais e fenômenos de ressonância associados ao veículo. Estão relacionadas com os defeitos do pavimento, como buracos e ondulações. A rugosidade superficial com comprimentos de onda maiores do que a da megatextura é referido como irregularidade.

Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

Em um trabalho realizado por Sandberg & Descornet (1980), foram determinados intervalos do comprimento de onda que influenciam no ruído gerado pela interação pneu-pavimento, a resistência ao rolamento dos pneus e a resistência à derrapagem. A Figura 2.36 mostra os resultados desse trabalho.

Figura 2.36 - Influência dos intervalos de comprimento de onda da textura da superfície.

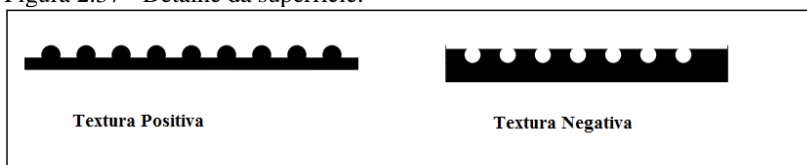


Fonte: FEHRL (2006).

Estudos apontam que a textura negativa da superfície ajuda na redução do ruído de geração mecânica. Textura negativa é aquela que a superfície do pavimento, é em grande parte, plana no topo, mas tem poros que podem criar caminhos de evacuação do ar ou da água. A superfície plana na parte superior propicia que as vibrações no pneu sejam reduzidas (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

A textura positiva, por sua vez, é formada com os agregados acima do plano da superfície. A altura do agregado saliente à superfície depende do tamanho máximo do agregado e da composição granulométrica. A textura positiva leva a níveis mais elevados de vibrações no pneu em deslocamento causando a geração dos mecanismos mecânicos (SANDBERG *et al.*, 2011). A Figura 2.37 ilustra o conceito de textura positiva e negativa de uma superfície.

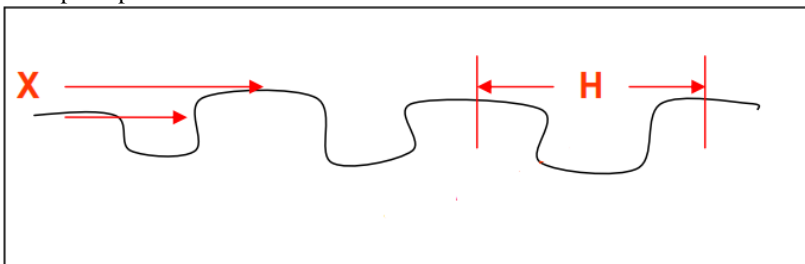
Figura 2.37 - Detalhe da superfície.



Fonte: Bendtsen *et al.* (2009 *apud* SANDBERG *et al.*, 2011).

Um modelo qualitativo tem sido sugerido para a textura da superfície que influencia a geração do ruído provocado pela interação pneu-pavimento. A Figura 2.38 ilustra a definição, onde X é a diferença de altura entre os picos de um perfil da superfície do revestimento, e H é a distância média entre os pontos mais altos desse perfil. Reduzindo-se X e H , garante-se uma superfície lisa que consegue reduzir as vibrações no pneu.

Figura 2.38 - Ilustração dos parâmetros da textura do pavimento que influencia o ruído pneu-pavimento.



Fonte: Sandberg *et al.* (2011).

Uma mistura asfáltica bem projetada no laboratório nem sempre é garantia de um bom desempenho em campo. A construção em alta escala envolve alguns problemas, tais como, a dificuldade de se obter uma mistura homogênea com a mesma textura projetada em laboratório (GOUBERT, 2014).

Para que se consiga a textura negativa das misturas de baixo ruído em campo, a compactação deve ser realizada em uma camada, utilizando apenas o rolo de chapa liso sem vibração (NCHRP, 2009; IRC, 2014).

Um parâmetro importante que influencia o ruído da interação pneu-pavimento, e está relacionado diretamente com a textura, é o tamanho máximo do agregado. Agregados de tamanho pequeno ajudam a reduzir o ruído gerado pelo mecanismo de impacto e choques, pois diminuem o contato superficial entre o pneu e a superfície do revestimento (FEHRL, 2006).

Portanto, quanto menor o tamanho máximo do agregado, menor é a emissão de ruído provocada pela interação pneu-pavimento. Assim, o revestimento do pavimento deve ter um tamanho máximo do agregado o menor possível (SANDBERG & EJSMONT, 2002; SANDBERG *et al.*, 2011).

Existem diversos métodos que foram desenvolvidos para caracterizar a textura das superfícies do pavimento. Entre os mais

utilizados estão a mancha de areia, o pêndulo britânico e os perfilômetros a laser.

a) Método da Mancha de Areia

O ensaio é prescrito pelas Normas NLT-335/87 e ASTM E 965 e avalia a macrotextura da superfície do pavimento. Consiste basicamente no espalhamento cuidadoso de uma determinada quantidade de areia com granulometria definida sobre a superfície de forma circular, medindo-se o raio de espalhamento (DNIT, 2006b). Com isso é possível calcular a altura da mancha de areia. A altura da areia é calculada de acordo com equação 2.26 (ASTM E 965, 1996).

$$H = \frac{V \times 4}{D^2 \times \pi} \quad (2.26)$$

onde:

- H: é a altura média da areia, em mm;
- V: é o volume de areia padrão (25000 mm³);
- D: diâmetro médio da mancha de areia, em mm.

Este ensaio não caracteriza bem a textura das misturas porosas, pois esses revestimentos apresentam uma textura negativa e a areia do ensaio acaba penetrando entre os vazios da mistura gerando um raio menor, sugerindo uma textura grosseira.

O objetivo principal do ensaio é determinar uma rugosidade que esteja nos limites aceitáveis para a segurança do usuário em relação a aderência pneu-pavimento. A textura superficial do pavimento é classificada de acordo com o Quadro 2.7. Os limites sugeridos pelo DNIT da altura média da mancha de areia para a segurança do usuário são 0,6 mm < H < 1,2 mm.

A FHWA, entretanto, recomenda que esse limite fique de 0,5 a 0,8 mm (KUEMMEL *et al.*, 2000).

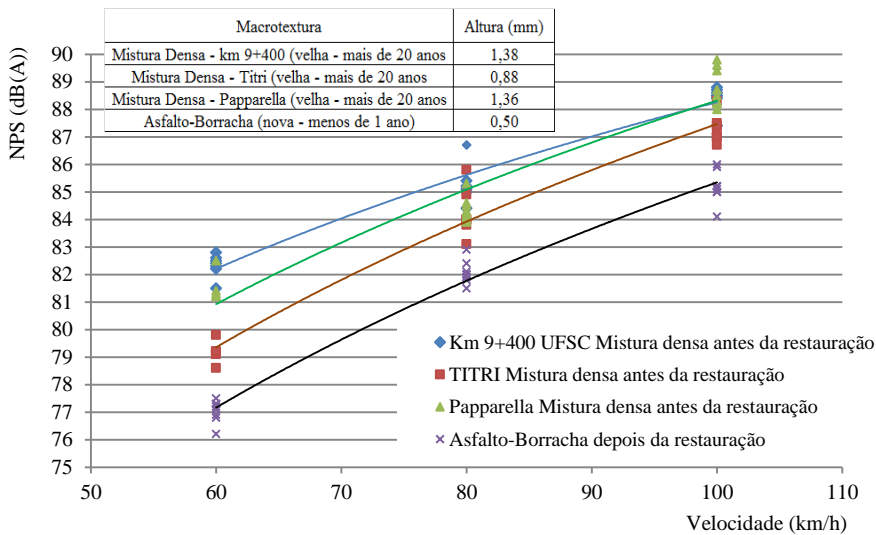
Quadro 2.7 - Classificação da macrotextura pelo método da Mancha de Areia.

Altura Média da Mancha de areia (cm)	Textura Superficial
$H < 0,20$	Muito fina ou muito fechada
$0,20 < H < 0,40$	Fina ou fechada
$0,40 < H < 0,80$	Média
$0,80 < H < 1,20$	Grosseira ou aberta
$H > 1,20$	Muito Grosseira ou aberta

Fonte: DNIT (2006a).

Estudos mostram que uma rugosidade elevada da superfície do pavimento aumenta o ruído gerado pela interação pneu-pavimento de geração mecânica. Knabben (2012), determinou o nível de pressão sonora dB(A) para diferentes rugosidades medidas pelo ensaio da mancha de areia na Avenida Beira-Mar, em Florianópolis. A Figura 2.39 mostra os resultados encontrados.

Figura 2.39 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego na Beira-Mar.



Fonte: Knabben (2012).

b) Pêndulo Britânico

O ensaio do Pêndulo Britânico é prescrito pela norma ASTM D 303, 1993 (Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Test) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Trata-se de um equipamento portátil, que tem uma haste padronizada com uma base de borracha. A haste é lançada na superfície molhada, com o objetivo de medir-se a perda de energia por atrito da base de borracha do pêndulo quando esta desliza sobre a superfície testada. O valor é expresso em BPN (British Pendulum Number). A Figura 2.40 mostra o equipamento.

Figura 2.40 - Pêndulo Britânico.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

O ensaio se presta para caracterizar a microtextura do revestimento do pavimento. A classificação da resistência à derrapagem, em função dos resultados do ensaio, é apresentada no Quadro 2.8. Tem-se recomendado o valor mínimo de 47 para garantir pelo menos uma microtextura medianamente rugosa.

Quadro 2.8 - Avaliação da microtextura do pavimento.

Classe de Resistência à Derrapagem / Método do Pêndulo Britânico	
Classes	Limites do BPN
Perigosa	< 25
Muito lisa	25 - 31
Lisa	32 - 39
Insuficientemente rugosa	40 - 46
Medianamente rugosa	47 - 54
Rugosa	55 - 75
Muito rugosa	> 75

Fonte: (DNIT, 2006b).

O Quadro 2.9 mostra recomendações do valor mínimo do BPN (British Pendulum Number) para diferentes categorias de rodovias do Reino Unido (British Pendulum Manual, 2000 *apud* ASI, 2007).

Quadro 2.9 - Valores mínimos sugeridos do BPN.

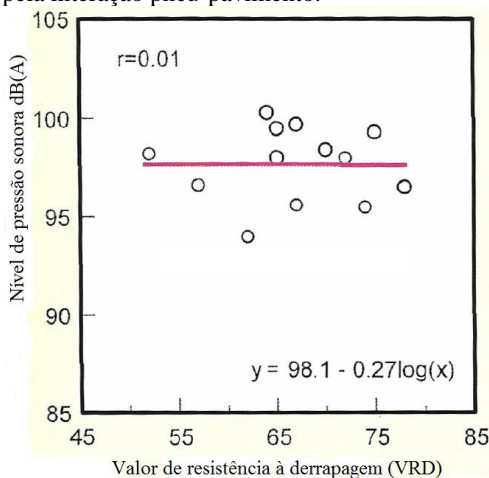
Classe	Categoria	Valo mínimo do BPN
A	Rotatórias (trevos)	65
	Curvas com raio menor que 150 m	
	Rampas com inclinação maior que 5% com mais de 100 m de comprimento	
	Locais perto dos semáforos em rodovias sem restrições de velocidade	
B	Autoestradas, entroncamentos e rodovias urbanas com tráfego pesado (mais 2000 veículos por dia)	55
C	Demais situações	45

Fonte: British Pendulum Manual (2000 *apud* ASI, 2007).

Estudos realizados não apontam qualquer relação entre os resultados do pêndulo britânico e o ruído gerado pela interação pneu-pavimento. A Figura 2.41 mostra os resultados de um estudo realizado no Japão (OSHINO *et al.*, 2001 *apud* SANDBERG & EJSMONT, 2002).

Entretanto, o ensaio do pêndulo britânico é importante na classificação da textura dos revestimentos de pavimento de baixa emissão de ruído, já que esses, por apresentarem textura negativa, não podem ser classificados através do ensaio da mancha de areia.

Figura 2.41 - Relação entre o VDR (resistência à derrapagem) e o ruído gerado pela interação pneu-pavimento.



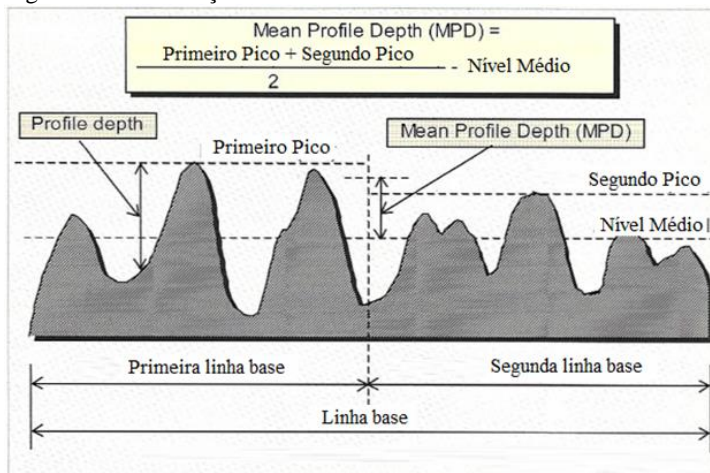
Fonte: Oshino *et al.* (2001 *apud* SANDBERG & EJSMONT, 2002).

c) Perfilômetro a Laser

O ensaio mais utilizado atualmente é do MPD (Mean Profile Depth) que é prescrito pela ISO 13473-1. O ensaio mede a profundidade média da textura utilizando um equipamento a laser. Essencialmente, é medida a profundidade média do perfil através de dois picos. A Figura 2.42 ilustra como se calcula o MPD (SANDBERG *et al.*, 2011). O ensaio caracteriza a textura tanto de uma mistura asfáltica densa quanto de uma mistura porosa.

Para um segmento qualquer, o MDP é calculado individualmente para um perfil de 100 mm em que o resultado final é a média dos valores individuais de cada perfil.

Figura 2.42 - Ilustração do cálculo do MPD.



Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

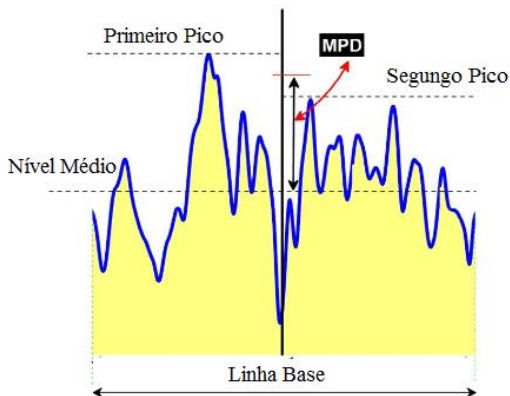
Paje *et al.* (2013) utilizaram um perfilômetro a laser dinâmico para determinar a macrotextura através do MDP de uma mistura asfáltica com borracha. A Figura 2.43 mostra o equipamento utilizado e a Figura 2.44 ilustra o resultado do MDP para um perfil do segmento.

Figura 2.43 - Perfilômetro a laser dinâmico do tipo PG-LA²IC.



Fonte: Paje *et al.* (2013).

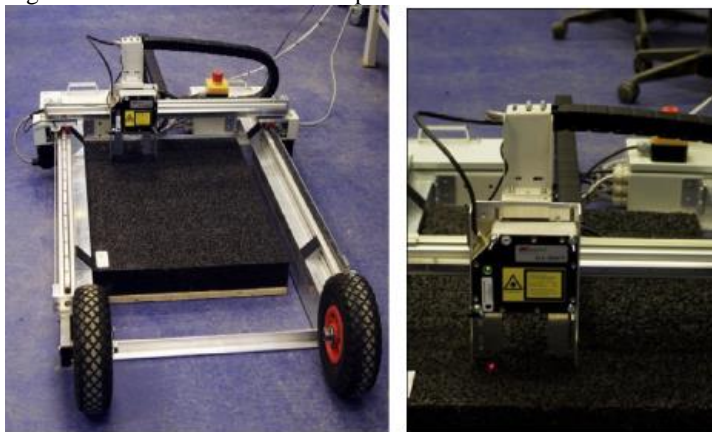
Figura 2.44 - Ilustração do cálculo do MDP para um perfil do segmento.



Fonte: Paje *et al.* (2013).

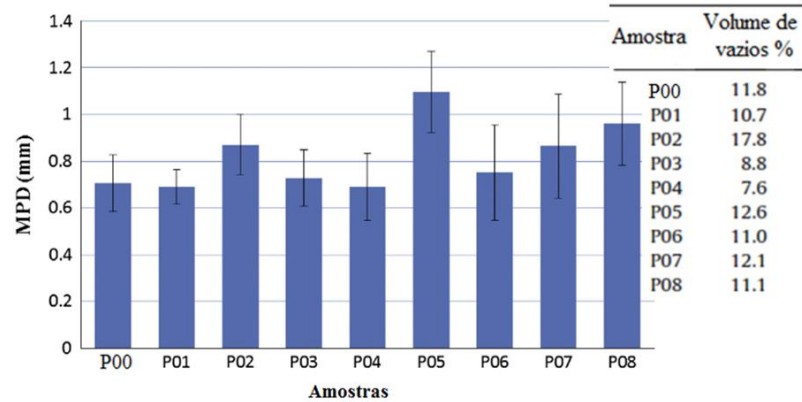
O MDP também pode ser calculado em amostras moldadas em laboratório ou extraídas do campo. A Figura 2.45 mostra um perfilômetro a laser realizando o ensaio em uma amostra em laboratório. O aparato é capaz de se mover na direção transversal e longitudinal coletando os dados em intervalos 0,1mm. A Figura 2.46 mostra o resultado do ensaio para diferentes texturas de amostras de misturas asfálticas (LI *et al.*, 2014).

Figura 2.45 - Perfilômetro a laser tipo LMI SLS 5000 Selcom.



Fonte: Li *et al.* (2014).

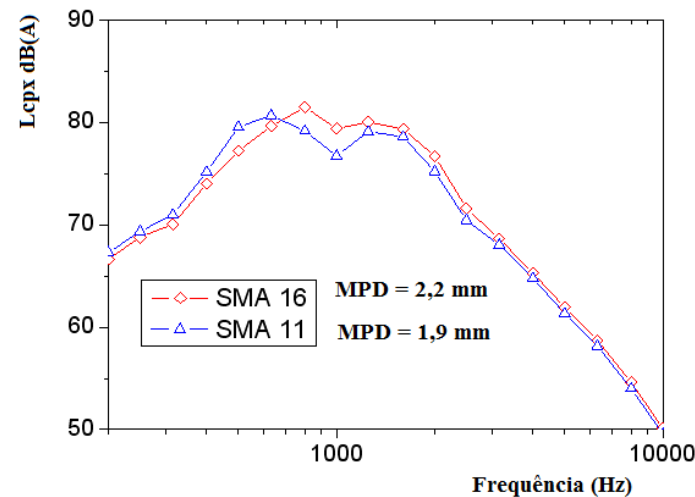
Figura 2.46 - MPD para diferentes amostras de misturas asfálticas.



Fonte: Li *et al.* (2014).

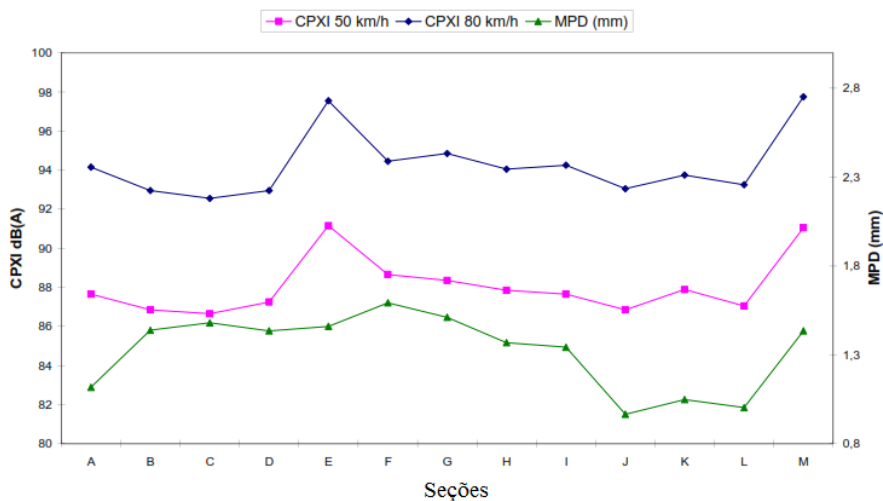
Parra *et al.* (2012) e Luong *et al.* (2012), realizaram medições do nível de pressão sonora utilizando o Trailer CPX para diferentes texturas de revestimento, caracterizadas através do MPD. A Figura 2.47 mostra a influência da textura do revestimento no ruído gerado pela interação pneu-pavimento em função do espectro da frequência e a Figura 2.48 ilustra a influência do MPD no ruído gerado pela interação pneu-pavimento representado pelo CPXI.

Figura 2.47 - Espectro do NPS medido com o Trailer CPX para 50 km/h.



Fonte: Luong *et al.* (2012).

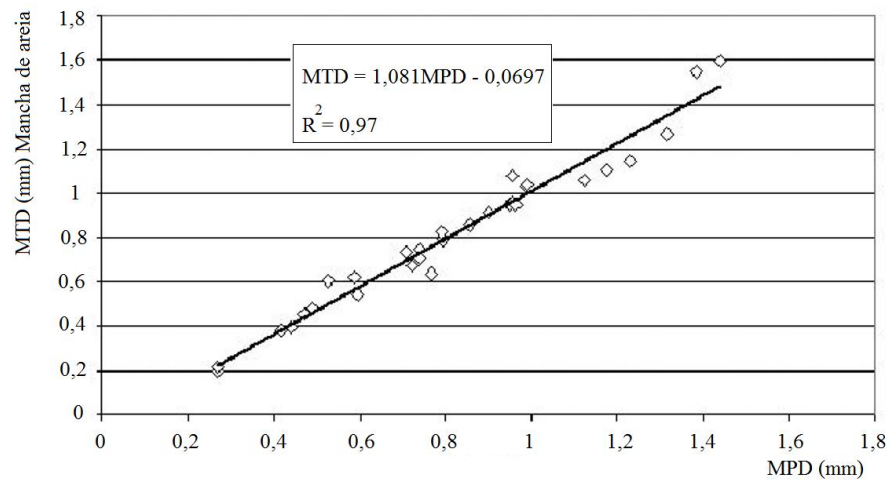
Figura 2.48 - Influência do MPD no CPXI.



Fonte: Parra *et al.* (2012).

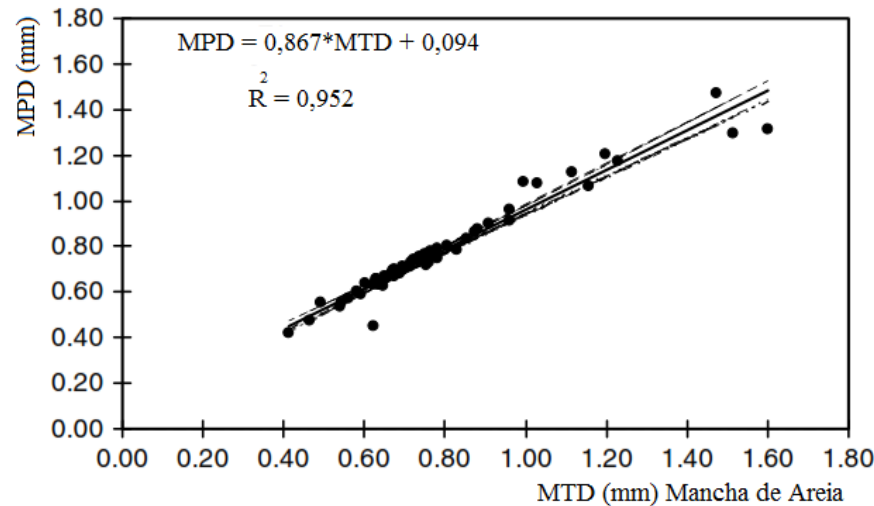
Diversos estudos comprovam que é possível correlacionar os resultados do método da mancha de areia com o MPD tendo sido desenvolvidos vários modelos que correlacionam os resultados desses dois ensaios (KUEMMEL *et al.*, 2000; HANSON e PROWELL, 2004; NCHRP, 2009; FISCO, 2009; SENGÖZ *et al.*, 2012). As Figuras 2.49 e 2.50 mostram excelentes correlações entre o MPD e o ensaio de mancha de areia (MTD).

Figura 2.49 - Relação entre MPD e MTD.



Fonte: Sengoz *et al.* (2012).

Figura 2.50 - Relação entre MPD e MTD com 95% de confiança.



Fonte: China & James (2012).

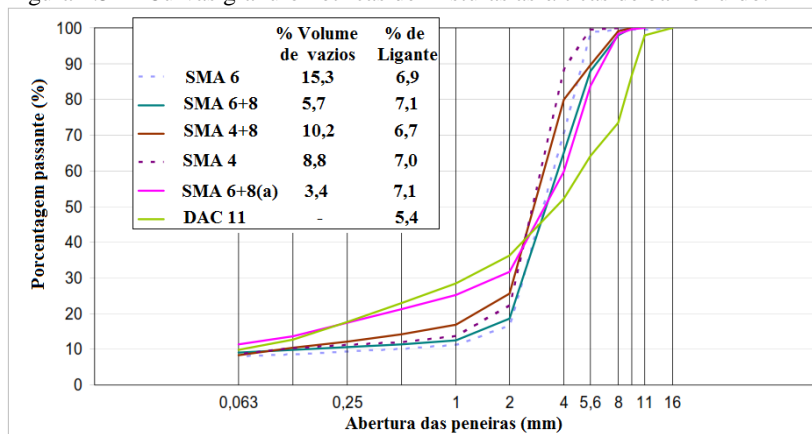
2.5.1.3 Granulometria

Na literatura internacional, diversas granulometrias são recomendadas para a obtenção de uma mistura asfáltica de baixo ruído.

A granulometria da mistura asfáltica de baixo ruído tem influência direta na sua capacidade de drenabilidade, resistência à desagregação, resistência à deformação permanente, na textura da superfície do revestimento e na capacidade de absorção sonora (NCHRP, 2009).

O Instituto de Rodovias da Dinamarca utilizou diferentes granulometrias para a obtenção de uma mistura asfáltica de baixo ruído. A Figura 2.51 mostra as curvas granulométricas (SANDBERG *et al.*, 2011).

Figura 2.51 - Curvas granulométricas de misturas asfálticas de baixo ruído.



Fonte: Thomsen *et al.* (2008 *apud* SANDBERG *et al.*, 2011)

O Departamento de Transporte de Washington (WSDOT) utiliza uma faixa granulométrica para as misturas asfálticas de baixo ruído, como mostra o Quadro 2.10.

Quadro 2.10 - Faixa granulométrica do WSDOT para misturas de baixo ruído.

Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)	
	Inferior	Superior
9,5	95	100
4,75	30	50
2,36	5	15
0,600	-	-
0,075	2	5

Fonte: Palmer (2012).

Na Austrália, recomenda-se a utilização de uma granulometria de acordo com os intervalos mostrados no Quadro 2.11 (SIMPSON *et al.*, 2014).

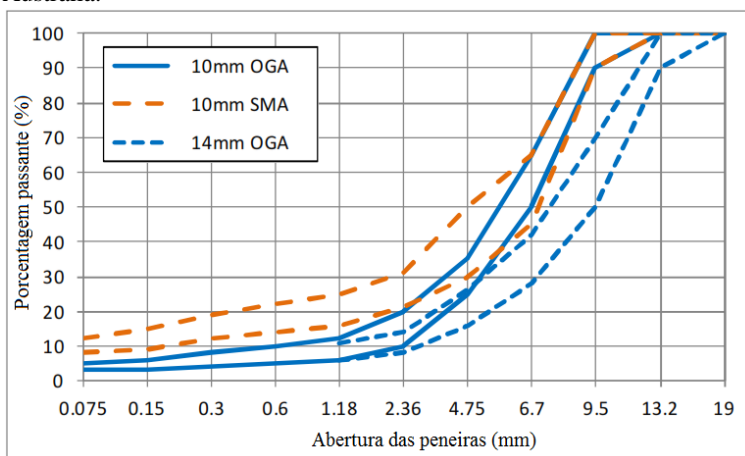
Quadro 2.11 - Faixa granulométrica de uma mistura de baixo ruído.

Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)	
	Inferior	Superior
13,2	100	100
9,5	90	100
6,7	50	65
4,75	25	35
2,36	10	20
1,18	6	12
0,6	5	10
0,3	4	8
0,15	3	6
0,075	3	5
Ligante (%)	6,5	
Vazios (%)	16,1	

Fonte: Simpson *et al.* (2014).

Também na Austrália, Buret *et al.* (2014) apresentaram faixas granulométricas para duas misturas porosas (OGM) e para uma SMA de baixo ruído. A Figura 2.52 mostra as faixas granulométricas.

Figura 2.52 - Faixas granulométricas para misturas asfálticas de baixo ruído na Austrália.



Fonte: Buret *et al.* (2014).

Na Espanha, as curvas granulométricas das misturas asfálticas de baixo ruído se encaixam nas faixas granulométricas mostradas no Quadro 2.12. A porcentagem de volume de vazios dessas misturas asfálticas pode variar de 15 a 22% (NCHRP, 2009).

Quadro 2.12 - Faixas granulométricas das misturas asfálticas de baixo ruído da Espanha.

Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)	
	Mist. 1	Mist. 2
20,0	100	100
12,5	75-100	70-100
10,0	60-90	50-80
5,0	32-50	15-30
2,50	10-18	10-22
0,63	6-12	6-13
0,075	3-6	3-6

Fonte: NCHRP (2009).

Com estudos realizados na Europa, a Universidade de Vilnius, na Lituânia, desenvolveu duas misturas asfálticas de baixo ruído. O Quadro

2.13 mostra as características destas misturas. Para rodovias de alto volume de tráfego, é recomendada a utilização da mistura com tamanho máximo do agregado de 8 mm. Quando o volume de tráfego é leve, recomenda-se a mistura asfáltica com tamanho máximo do agregado de 5 mm (VOROBOVAS *et al.*, 2014).

Quadro 2.13 - Mistura asfáltica de baixo ruído da Lituânia.

% Passante	SMA 5 TM	SMA 8 TM
> 8 mm	100 %	90-100 %
> 5 mm	85-100 %	20-30 %
> 2 mm	20-30 %	15-20 %
< 0,063 mm	6-9 %	5-8 %
Ligante	≥ 7,0 %	≥ 6,5 %
% de volume de vazios	7-9 %	8-10 %

Fonte: Vorobjovas *et al.* (2014).

Na Suíça, a típica faixa granulométrica para misturas de baixo ruído é mostrada no Quadro 2.14.

Quadro 2.14 - Faixa granulométrica de uma mistura asfáltica de baixo ruído da Suíça.

Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)	
	Inferior	Superior
11,2	100	100
5,6	90	100
2,8	15	40
2,0	10	25
0,5	4	10
0,09	3	5

Fonte: NCHRP (2009).

2.5.1.4 Impedância mecânica e idade da superfície do revestimento

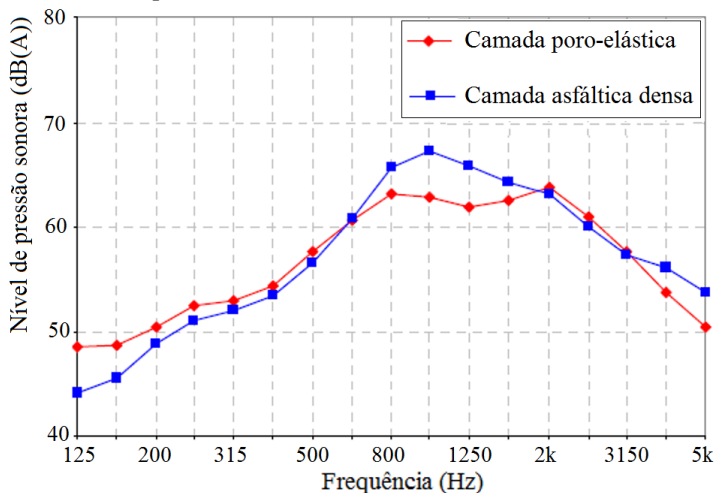
A rigidez da superfície do pavimento, ou impedância mecânica, está associada ao ruído gerado pelos mecanismos de impactos e choques da interação pneu-pavimento. Como a borracha do pneu tem uma rigidez muito menor que a superfície do pavimento, a redução da rigidez da rodovia tenderá a reduzir as forças de impacto transmitidas em um pneu

reduzindo assim os níveis de vibração dos mesmos e, consequentemente, a geração de ruídos (FEHRL, 2006). Ou seja, quanto maior a rigidez da superfície, maior será a geração do ruído pneu-pavimento.

A impedância mecânica é a medida da capacidade de uma estrutura de resistir ao movimento quando submetido a uma determinada força.

Num experimento realizado pela empresa alemã M+P Consulting Engineers, foram efetuadas medições de ruído utilizando o método *Coast-by* sobre um revestimento asfáltico denso comum e de uma camada asfáltica poro-elástica. O nível de pressão sonora da camada poro-elástica é menor nas frequências de 800 a 1.600 Hz em comparação com a camada asfáltica densa. O resultado do teste é mostrado na Figura 2.53 (LI, 2013).

Figura 2.53 - Máximo ruído *Coast-by* para velocidade de 80 km/h em uma camada densa e poro-elástica.



Fonte: Li (2013).

LI (2013), mostrou que a impedância mecânica está linearmente relacionada com o logaritmo do módulo de resiliência. A partir dessa relação, descobre-se que uma forma eficaz para reduzir a impedância mecânica é através do uso de materiais de baixa rigidez, tais como os materiais poro-elásticos. Testes de impedância mecânica realizados para diferentes revestimentos de pavimento comuns mostraram resultados semelhantes (FREITAS *et al.*, 2014).

A rigidez de um material influencia também a impedância acústica. Materiais muito rígidos refletem quase que totalmente uma onda sonora incidente.

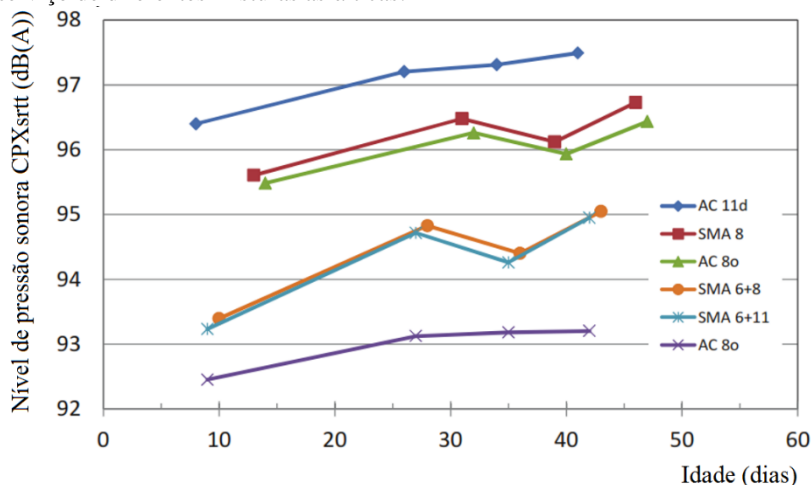
Hamet *et al.* (2000), concluíram que as misturas asfálticas com borracha não apresentam redução significativa do nível de ruído devido a sua menor rigidez.

No entanto, por ter uma rigidez menor a utilização de revestimento com asfalto borracha vem sendo uma solução adequada para tentar diminuir a geração do ruído pneu-pavimento da parcela mecânica de impactos e choques (FEHRL, 2006). A maioria dos experimentos de laboratório indica que o asfalto-borracha, de um modo geral, apresenta uma melhoria nas propriedades físicas, químicas e de desempenho dos pavimentos asfálticos (MORENO *et al.*, 2011; FONTES, 2009).

Com o avanço da idade do revestimento do pavimento, o desempenho acústico tenderá a diminuir devido ao aumento da rigidez, deterioração dos materiais e as mudanças na textura da superfície. Para as superfícies porosas, a colmatação dos poros também pode reduzir a eficiência acústica ao longo do tempo (FEHRL, 2006).

A Figura 2.54 mostra o nível de pressão sonora medido através do método do trailer CPX para diferentes tipos de misturas asfálticas ao longo das primeiras semanas.

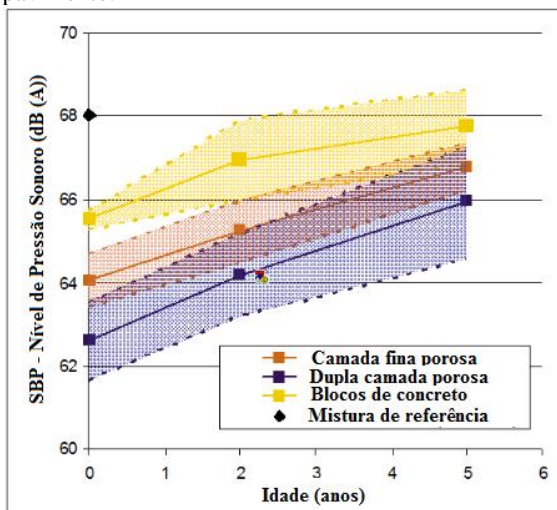
Figura 2.54 - Nível de pressão sonora CPX em função das primeiras semanas de serviço de diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Oddershede (2011 *apud* KRAUGH *et al.*, 2012).

Em um estudo realizado na Holanda com diferentes tipos de revestimento do pavimento foi medido o nível de pressão sonora através do método SPB, para diferentes idades. A Figura 2.55 ilustra os resultados que mostram que com o passar do tempo o ruído gerado pela interação pneu-pavimento aumenta.

Figura 2.55 - Ruído pneu-pavimento para diferentes idades do revestimento do pavimento.



Fonte: Groenendijk (2011 *apud* SANDBERG *et al.*, 2011).

2.5.2 Condições Climáticas

Estudos revelam que as precipitações, quando geram uma película de água na superfície da camada de rolamento, podem aumentar a pressão sonora gerada pelo tráfego (FEHRL, 2006).

Sandberg & Ejsmont (2002) fizeram uma estimativa dos efeitos da água no ruído gerado pela interação pneu-pavimento. O Quadro 2.15 mostra os resultados do estudo.

Quadro 2.15 - Estimativa do efeito da água no nível de pressão sonora.

Grau de umidade	0-60 km/h	61-80 km/h	81-130 km/h
Seco	Referência	Referência	Referência
Umidade devido ao degelo (usando sal) ou devido a chuviscos	+2 dB	+1 dB	+0 dB
Umidade devido à chuva moderada	+4 dB	+3 dB	+2 dB
Umidade devido à chuva intensa	+6 dB	+4 dB	+3 dB

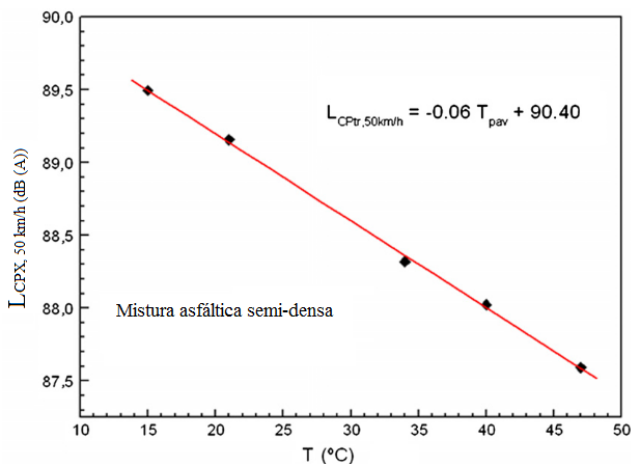
Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

Outra condição climática que influencia a geração do ruído pneu-pavimento é a temperatura. De uma forma geral, um aumento de temperatura traduz-se numa redução do nível de ruído. Dependendo de cada situação, a correção a ser feita no nível de ruído é variável (FREITAS *et al.*, 2006; IRALI *et al.*, 2015).

Estudo realizado por Bueno *et al.* (2011), mostrou que a temperatura do pavimento influencia o nível de pressão sonora medido pelo método do CPX. Para uma velocidade de referência de 50 km/h, o estudo aponta que o aumento da temperatura da superfície conduz a uma redução nos níveis sonoros. A Figura 2.56 mostra a relação linear entre a temperatura e o ruído pneu-pavimento caracterizado pelo ensaio do CPX.

Isto poderia ser explicado pela redução nos mecanismos de vibração e impacto resultantes de uma redução da rigidez da superfície do asfalto com o aumento da temperatura. Neste sentido, a emissão sonora gerada por adesão e atrito entre o pneu e o pavimento, responsável pelo ruído nas altas frequências, também pode ser afetado (BUENO *et al.*, 2011).

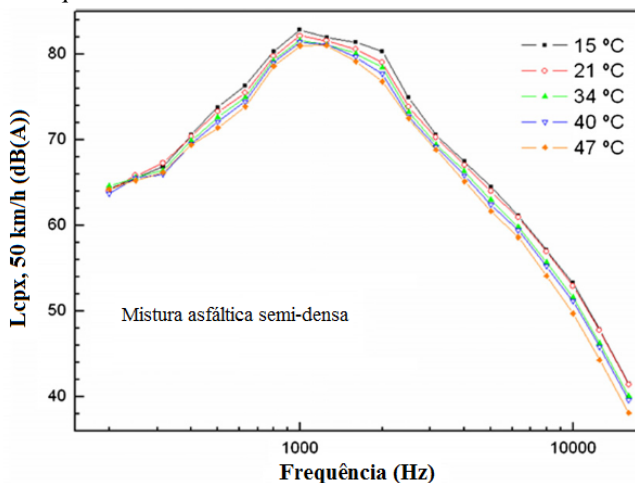
Figura 2.56 - Relação entre temperatura do pavimento e pressão sonora.



Fonte: Bueno *et al.* (2011).

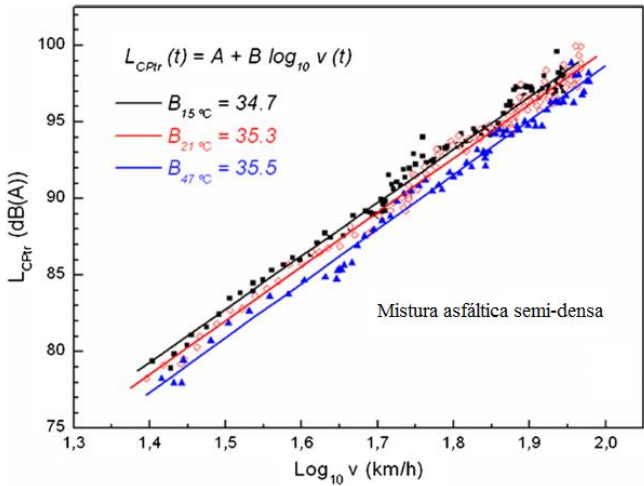
A temperatura do pavimento influencia principalmente o ruído de média e alta frequência. A Figura 2.57 mostra o ruído pneu-pavimento CPX para diferentes temperaturas em função da frequência. A Figura 2.58 mostra o nível de pressão sonora CPX para diferentes temperaturas em função de diferentes velocidades de referência.

Figura 2.57 - Relação entre nível sonora e temperatura em função do espectro da frequência.



Fonte: Bueno *et al.* (2011).

Figura 2.58 - Relação entre nível de pressão sonora e temperatura em função da velocidade.



Fonte: Bueno *et al.* (2011).

Em um estudo realizado por Bühlmann e Ziegler (2013), foram testados 124 tipos de pneus com diferentes combinações de superfícies. A influência da temperatura na emissão do ruído pneu-pavimento é apresentada no Quadro 2.16. As medições do ruído foram realizadas utilizando o trailer-CPX.

Quadro 2.16 - Influência da temperatura no ruído pneu-pavimento

Item	Ruído/temperatura (dB(A)/°C)
Média geral	-0,10

Fonte: Bühlmann & Ziegler (2013).

2.5.3 Veículos

O ruído do tráfego gerado somente pelos veículos tem sido estudado pelas indústrias de automóveis ao longo dos anos, em que basicamente, o tipo de veículo, a velocidade e o tipo de pneu são os fatores principais responsáveis pela emissão desse ruído.

Atualmente, existe uma considerável redução do ruído gerado pelos veículos em relação há duas décadas atrás. A tendência é que essa

redução seja ainda maior com o passar dos anos, notadamente com o aumento do veículo elétrico no mercado.

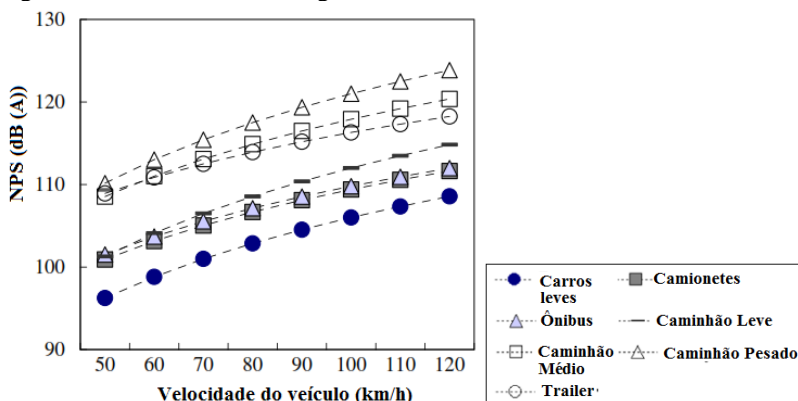
2.5.3.1 Tipo de veículo

O tipo do veículo tem grande influência na geração do ruído do tráfego, principalmente em baixas velocidades, em que o ruído do motor se sobressai em relação ao ruído da interação pneu-pavimento.

A partir dos anos de 1970, a União Europeia passou a limitar os valores de ruído dos veículos vendidos na Europa. Com isso os fabricantes de automóveis têm buscado soluções, investindo em tecnologia, para reduzir cada vez mais o ruído gerado pelo motor (BENDTSEN e ANDERSEN, 2005).

O ruído total gerado por um veículo é afetado principalmente pela sua velocidade e pelo tipo de superfície. Portanto, essas considerações são fundamentais para a implementação de um modelo de previsão de ruído que considera as características de veículos. Cho e Mun (2008), mediram o nível de pressão sonora para diferentes categorias de veículos. Os resultados encontrados em uma mistura do tipo SMA são apresentados na Figura 2.59.

Figura 2.59 - Influência da categoria do veículo na emissão de ruído.



Fonte: Cho & Mun (2008).

Em estudos realizados no Reino Unido, as rodovias foram divididas em duas classes para três configurações de veículos. O nível de pressão sonora foi medido para quatro velocidades referência. O Quadro

2.17 mostram os resultados dos levantamentos (ABBOTT, 2008 *apud* SANDBERG *et al.*, 2011).

Quadro 2.17 - Velocidade de referência/nível de pressão sonora para diferentes categorias de veículos e rodovias.

Velocidade (km/h) / NPS (dB)	NPS (dB) Veículo leve	NPS (dB) Veículo com eixo duplo	NPS (dB) Veículo com vários eixos
Rodovia de alta velocidade	110 / 84,7 dB	90 / 86,6 dB	90 / 89,1 dB
Rodovia de média velocidade	80 / 81,1 dB	70 / 83,8 dB	70 / 86,6 dB

Fonte: Abbott (2008 *apud* SANDBERG *et al.*, 2011).

2.5.3.2 Tipo de pneu

O tipo de pneu tem grande influência na geração do ruído. No mercado existem milhares de modelos diferentes. O desenho da superfície do pneu e a profundidade das suas ranhuras afetam a geração do ruído. De uma forma simplista, um padrão de superfície de pneu silencioso é aquele que permite que o ar escape por entre as suas ranhuras, à medida que o mesmo entra em contato com a superfície do pavimento (SANDBERG & EJSMONT, 2002).

Outro fator importante na geração do ruído é a largura do pneu. Quando o pneu passa da largura de 165 mm para 185 mm ocorre um acréscimo de 2,4 dB (A) (EJSMONT, 1997). Quando são comparados pneus de 145 mm com de 200 mm, o acréscimo é ainda maior, chegando aos 5 dB (A) (SANDBERG, 2001).

Em um estudo realizado em conjunto com diversos países foram feitas medições de ruído utilizando o método do trailer CPX para diversos modelos de pneus (SCHWANEN *et al.*, 2008). O Quadro 2.18 mostra o nível CPX para 10 modelos de pneus em uma mistura asfáltica porosa fina em que a velocidade de referência foi de 80 km/h.

Quadro 2.18 - Valor médio do Nível CPX de 7 microfones para diferentes modelos de pneus com velocidade de referência de 80 km/h.

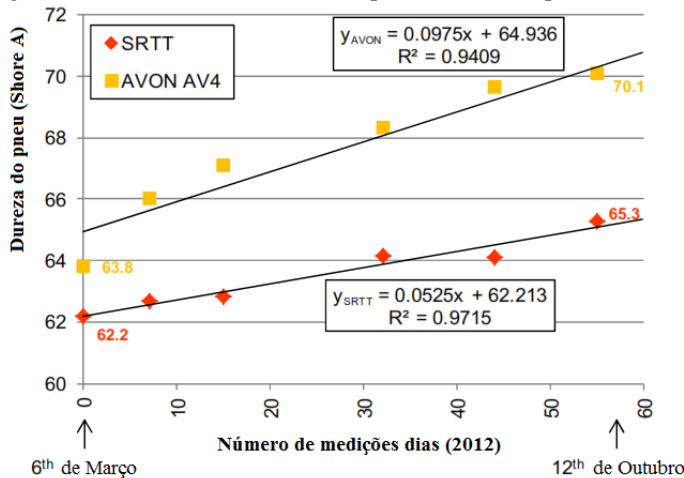
Modelo do pneu	Nível CPX dB(A)
BFGoodrich Mud-Terrain	97,5
Avon AV4 (CPX)	93,5
Dunlop SP LT 800	92,5
Vredestein TransportSnow	96,2
Dunlop SP Arctic version 2	98,5
Vredestein HiTrac	93,8
Uniroyal Tigerpaw SRTT (CPX)	91,9
Michelin Energy	91,7
Continental ContiEcoContact	93,5
AVON ZV1	91,0

Fonte: Schwanen *et al.* (2008).

Em um estudo realizado nos pneus de referência do ensaio do trailer CPX (Avon AV4 e ASTM SRTT), foi medida a dureza dos pneus ao longo da quantidade de ensaios realizados e verificada a sua influência no nível de pressão sonora. A Figura 2.60 e o Quadro 2.19 mostram os resultados do estudo. Verificou-se que a dureza e o número de medições têm uma relação linear com nível de pressão sonora, e este aumenta com o aumento da dureza do pneu (BÜHLMANN *et al.*, 2013).

A dureza do pneu é medida por equipamento padronizado chamado de durômetro Shore. O método consiste em medir a resistência de deformação baseados na profundidade de penetração com a aplicação de uma carga. O ensaio é prescrito pela ASTM D2240-00 tendo um total de 12 escalas em que as escalas A e D são as mais comuns. Para a escala A, é utilizado uma haste de aço temperado de 1,1 a 1,4 milímetros em formato de cone, com um ângulo 35 graus, com uma massa 0,822 kg, gerando uma força de 8,064 N.

Figura 2.60 - Influência da dureza do pneu no nível de pressão sonora CPX.



Fonte: Bühlmann *et al.* (2013).

Quadro 2.19 - Efeito da dureza do pneu no aumento do nível de pressão sonora.

	Pneus de Referência CPX	
	SRTT	Avon AV4
Aumento do ruído em 2012	+0,9 dB (A)	+0,9 dB (A)
Aumento do ruído por unidade Shore A	+0,3 dB(A) / unid Shore A	+0,15 dB(A) / unid Shore A
Aumento do ruído por medição-dia	+0,015 dB(A) / medição.dia	+0,015 dB(A) / medição.dia

Fonte: Bühlmann *et al.* (2013).

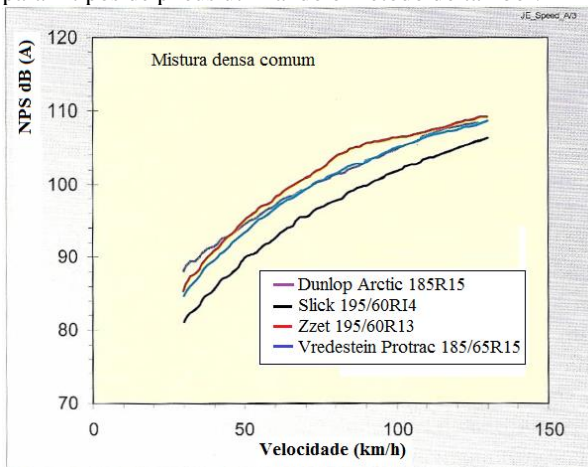
2.5.3.3 Velocidade do veículo

A intensidade do ruído gerado pela interação pneu-pavimento aumenta linearmente com o logaritmo da velocidade do veículo.

Foram realizadas medições do nível de pressão sonora utilizando o método do tambor e os resultados foram obtidos da média das medições de dois microfones. Para apresentação das características do ruído em função da velocidade, foram selecionados quatro pneus diferentes. As Figuras 2.61 e 2.62 mostram a relação entre o ruído pneu-pavimento e a velocidade (SANDBERG & EJSMONT, 2002).

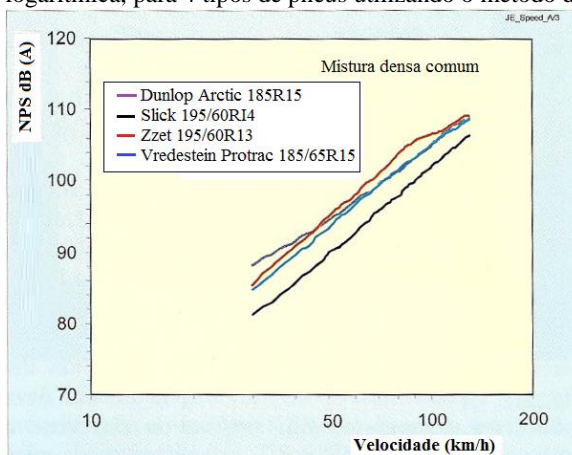
A relação entre o ruído e a velocidade é não linear quando se usa uma escala de velocidade linear. No entanto, quando se converte a escala de velocidade para logarítmica, a relação parece ser linear. Esse comportamento pode ser observado em diversas pesquisas de uma forma geral (SANDBERG & EJSMONT, 2002).

Figura 2.61 - Influência típica da velocidade, em uma escala de velocidade linear, para 4 tipos de pneus utilizando o método do tambor.



Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

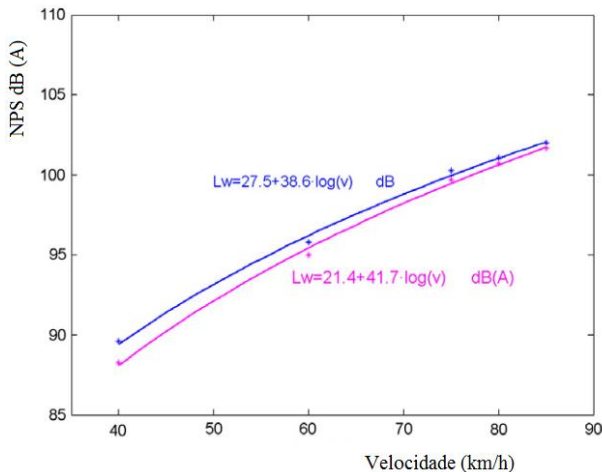
Figura 2.62 - Influência típica da velocidade, em uma escala de velocidade logarítmica, para 4 tipos de pneus utilizando o método do tambor.



Fonte: Sandberg & Ejsmont (2002).

Em um estudo conduzido por Davo *et al.* (2013) foram realizadas medições do ruído pneu-pavimento utilizando o método do Coast-by. Os resultados mostraram que o nível de pressão sonora tem uma relação logarítmica com a velocidade como ilustra a Figura 2.63.

Figura 2.63 - Nível de pressão sonora versus velocidade do veículo.



Fonte: Davo *et al.* (2013).

2.6 RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Através da revisão bibliográfica são apresentados os conceitos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho:

- O ruído de tráfego é alvo de intensas pesquisas em diversos países. A exposição contínua a esse ruído gera diversos malefícios à saúde humana;

- Os mecanismos de geração do ruído pneu-pavimento são divididos em duas classes: a) Mecânicos e b) Aerodinâmicos. O primeiro está diretamente relacionado com a textura do revestimento asfáltico. O segundo sofre influência direta da porosidade do revestimento;

- O ruído gerado pela interação pneu-pavimento é fonte dominante para velocidade do veículo acima de 40 km/h. Abaixo disso, a fonte dominante do ruído é a do motor dos veículos. Entretanto, com o avanço da tecnologia e o aumento do veículo elétrico no mercado apenas o ruído gerado pela interação pneu-pavimento será relevante para qualquer velocidade;

- Misturas asfálticas porosas são capazes de reduzir os mecanismos de geração aerodinâmica do ruído. Isso é possível, pois, admitem a passagem do fluxo de ar, ocasionando dessa forma a propagação das ondas sonoras por dentro do material;

- A textura do revestimento tem grande influência na geração do ruído pneu-pavimento. As texturas consideradas negativas, ou seja, que possuem a face plana do agregado voltadas para cima, causam menor vibração dos pneus, gerando menor ruído da parcela mecânica, principalmente, de impactos e choques. Por sua vez, a textura positiva apresenta os agregados expostos, acima do plano da superfície. Com isso essa textura aumenta as vibrações sobre o pneu em movimento;

- Através do ensaio do tubo de impedância é possível determinar o coeficiente de absorção sonora, que representa a capacidade da superfície de não refletir a energia acústica incidente. O revestimento que tenha um coeficiente mínimo de absorção sonora, que possa reduzir o ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos principalmente de bombeamento do ar;

- O método mais utilizado para a avaliação da geração do ruído pneu-pavimento é o do Trailer-CPX. Com 4 microfones instalados próximos aos pneus de referência do Trailer, é possível determinar o índice acústico do revestimento estudado. Para a fabricação e utilização do Trailer-CPX é necessário a realização da sua certificação através de testes específicos, determinados pela norma Norma ISO 11819-2 (2010);

- Um revestimento é considerado de baixo ruído quando consegue diminuir a parcela de geração do ruído aerodinâmico através da sua porosidade, e ainda apresenta uma textura negativa, capaz de reduzir as vibrações do pneu e diminuir a parcela de geração mecânica;

- Revestimentos de baixo ruído apresentam coeficiente de absorção sonora entre 0,3 e 0,9. Estudos revelam que uma porosidade de 11 a 18% já seria suficiente para redução da parcela do ruído aerodinâmico. Ainda, esses revestimentos, mostram uma redução significativa da parcela da geração do ruído mecânico, utilizando texturas negativas, com o tamanho máximo do agregado menor.

CAPÍTULO 3 - MÉTODO DA PESQUISA

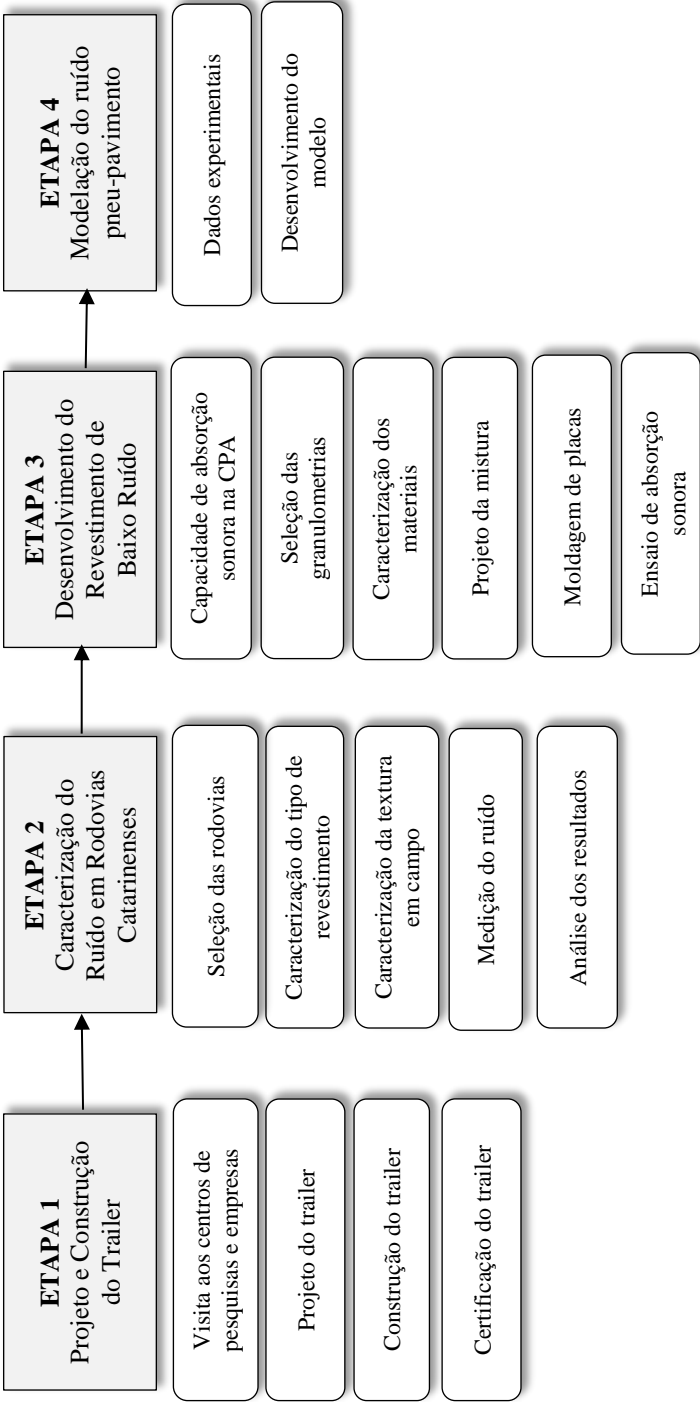
Este capítulo apresenta a metodologia e os materiais para alcançar os objetivos propostos, tendo como base a revisão da literatura.

O objetivo principal do trabalho é o desenvolvimento de um trailer que possa medir exclusivamente o ruído da interação pneu-pavimento. Para isso, centros de pesquisas e empresas especializadas na Europa foram visitados.

O trabalho também contempla o desenvolvimento de uma mistura asfáltica de baixa emissão de ruído. Foram projetadas misturas asfálticas para duas curvas granulométricas. A dosagem das misturas foi realizada utilizando o compactador giratório SuperPave. As misturas dosadas foram otimizadas em relação à sua capacidade de absorção sonora utilizando o tubo de impedância. Por fim, foi desenvolvido um modelo para o projeto da mistura asfáltica que possa prever o ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma que resume as etapas da pesquisa.

Figura 3.1 - Fluxograma do método da pesquisa



3.1 ETAPA 1 – Projeto e Construção do Trailer-CPX

Essa etapa apresenta os métodos utilizados para a realização do projeto e da construção do Trailer-CPX. A Figura 3.2 ilustra o fluxograma dessa etapa.

Figura 3.2 - Fluxograma da Etapa 1



3.1.1 Visita aos centros de pesquisas e empresas

Para o desenvolvimento do Trailer-CPX foi necessária a visita em centros de pesquisas e em empresas na Europa especializadas na medição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento. Com isso, encontrou-se subsídios para a elaboração de um projeto do trailer que pudesse medir o ruído da interação pneu-pavimento de acordo com as normas europeias. Foram realizadas reuniões com alguns pesquisadores de referência mundial na área do ruído pneu-pavimento e que trabalham com o Trailer-CPX, entre eles: Dr. Gijsjan van Blokland (Holanda); Dr. Wim van Keulen (Holanda); Dr. André Molenaar (Holanda); Dr inż. Piotr Mioduszewski (Polônia); Dr Jerzy A. Ejsmont (Polônia); Dr. Ulf Sandberg (Suécia) e o Dr. Mingliang LI (China).

Foram visitadas três empresas e três centros de pesquisas: A empresa alemã M+P-Consulting Engineers, na filial situada em Vlijmen

na Holanda; a empresa VanKeulen advies, localizada em Vlijmen, na Holanda; a empresa Breijn B.V. Engenharia com sede em Hertogenbosch na Holanda; a Universidade Politécnica de Gdansk, na Polônia; a Universidade Tecnológica de Delft, na Holanda; e o centro de pesquisa Cedex, localizado na Espanha.

3.1.2 Projeto do Trailer-CPX

O Trailer-CPX foi projetado para simular um eixo padrão de um veículo com a carga de 320 kg por pneu e seguiu as recomendações da norma Norma ISO 11819-2 (2010). O eixo padrão utilizado, é composto por molas e amortecedores devidamente dimensionados.

A estrutura do Trailer foi projetada para que os quatro microfones pudessem ser acoplados próximos aos pneus de referência.

3.1.3 Construção do Trailer-CPX

O Trailer foi construído pela empresa Império Reboques Ltda., DE Florianópolis que possui uma larga experiência na construção e homologação junto ao Detran dos mais variados tipos de trailers.

3.1.4 Certificação do Trailer-CPX

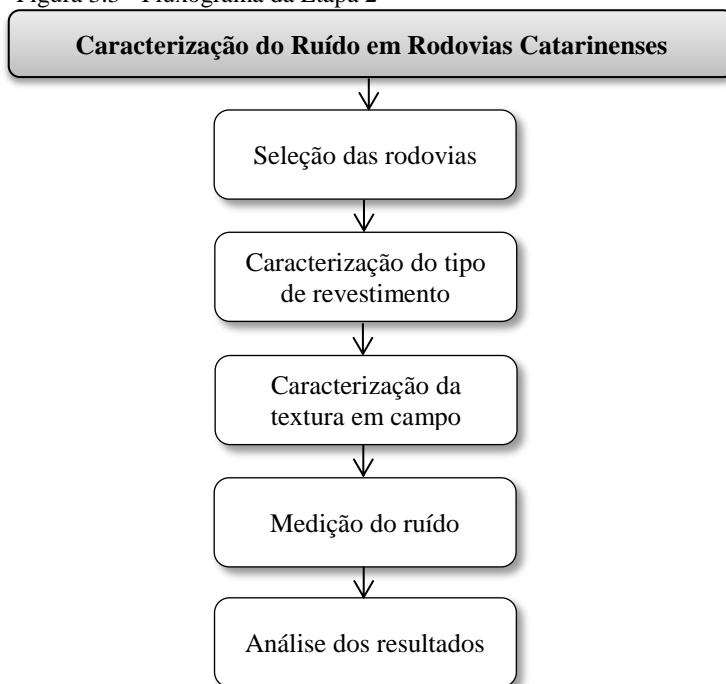
A certificação do Trailer seguiu a Norma ISO 11819-2 (2010) que é usada para as medições do ruído pneu-pavimento que utilizam o Trailer-CPX. Foram realizados os seguintes testes:

- a) Certificação da Espuma do Trailer.
- b) Teste de Reflexão;
- c) Teste do Ruído do Veículo de Reboque; e
- d) Teste do Ruído dos Veículos Externos.

3.2 ETAPA 2 – Caracterização do Ruído em Rodovias Catarinenses

A presente etapa visou a caracterização do ruído em rodovias catarinenses com diferentes tipos de revestimento e textura utilizando-se o Trailer-CPX. A Figura 3.3 apresenta o fluxograma dessa etapa.

Figura 3.3 - Fluxograma da Etapa 2



3.2.1 Seleção das rodovias

Foram selecionadas 5 rodovias catarinenses para a caracterização do ruído pneu-pavimento. Duas rodovias federais (BR-101 e BR-282) uma municipal (Beira-Mar Norte, Florianópolis) e duas estaduais (Via Rápida de Criciúma – trecho SC-446 a BR-101 e a SC-403, Florianópolis). Essas rodovias foram escolhidas por apresentarem uma grande quantidade de diferentes tipos de revestimentos de pavimento.

3.2.2 Caracterização do tipo de revestimento

As avaliações do ruído foram realizadas em diferentes tipos de revestimentos. Os revestimentos foram caracterizados de acordo com a sua granulometria, diâmetro máximo do agregado, tipo de rocha e tipo de ligante. Esses dados foram disponibilizados pelo Deinfra (Departamento Estadual de Infraestrutura) e DNIT (Departamento Nacional de

Infraestrutura de Transporte) de Santa Catarina. Basicamente, nesta etapa foram avaliados os seguintes tipos de revestimentos:

- misturas asfálticas densas na faixa “C” do DNIT e “D” do Deinfra com ligante convencional com diferentes idades (Avenida Beira-Mar, em Florianópolis e BR-101);
- misturas asfálticas densas na faixa “B”, “C” e “D” com ligante modificado, também com diferentes idades de abertura ao tráfego (Avenida Beira-Mar, em Florianópolis e BR-101);
- camada porosa de atrito (BR-282);
- misturas asfálticas do tipo *gap graded* (Criciúma);
- pavimento rígido de concreto localizado na BR-101 e em Florianópolis.

3.2.3 Caracterização da textura em campo

Foram determinadas as macrotexturas dos revestimentos dos pavimentos dos segmentos testes através do Método da Mancha de Areia utilizando as diretrizes da Norma ASTM E 965.

3.2.4 Método de Medição do Ruído

Para a medição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento nos diferentes revestimentos do pavimento foi utilizando o método do Trailer-CPX. O ensaio é prescrito pela norma ISO 11819-2 (ISO, 2010).

As medições foram realizadas nos segmentos teste na velocidade de referência de 80 km/h.

Os segmentos testes de cada revestimento foram de pelo menos 200,0 metros em tangente.

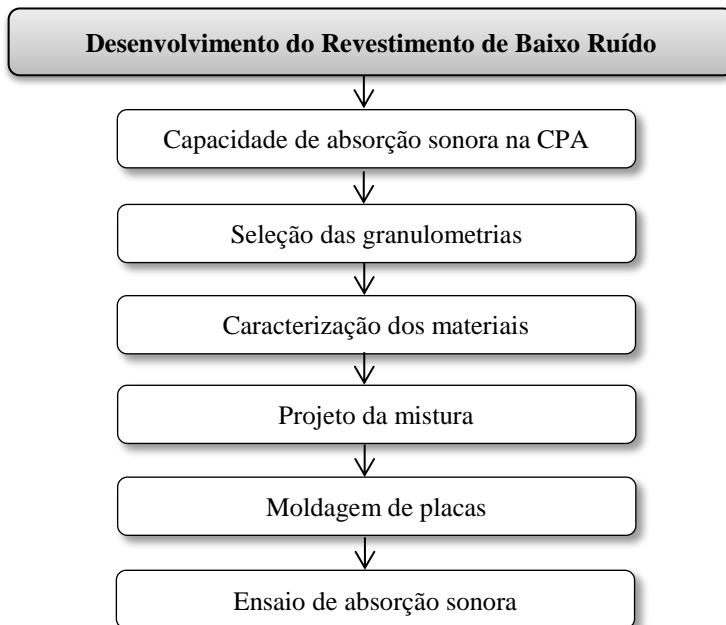
3.2.5 Análise dos resultados

Foram relacionados os tipos de revestimentos das rodovias e suas propriedades, com o ruído gerado pela interação pneu-pavimento calculado pelo método do Trailer-CPX. Ainda foram extraídos corpos de prova da mistura porosa através de sonda rotativa (BR-282) e realizados os ensaios de absorção sonora (vide item 3.3.1), para avaliar a influência do coeficiente de absorção na redução do ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

3.3 ETAPA 3 – Desenvolvimento do Revestimento de Baixo Ruído

Essa etapa teve como objetivo o desenvolvimento de uma mistura asfáltica de baixo ruído. A Figura 3.4 mostra o fluxograma da etapa.

Figura 3.4 - Fluxograma da Etapa 3



3.3.1 Capacidade de absorção sonora da mistura CPA

Foram realizados os ensaios de absorção sonora com o tubo de impedância na mistura asfáltica do tipo CPA. Com o objetivo de se caracterizar a capacidade de absorção sonora desta mistura, foram extraídos corpos de prova com sonda rotativa na região onde foram feitas as medições do ruído pneu-pavimento com o Trailer-CPX.

A partir dos resultados da avaliação da capacidade de absorção sonora definiu-se que um revestimento silencioso deveria apresentar as porcentagens de volume de vazios no mínimo igual a mistura CPA aplicada na BR 282 – Trecho Lages a Campos Novos.

Como base nessa premissa, e na revisão da literatura internacional, procurou-se desenvolver em laboratório uma mistura silenciosa com as características da mistura CPA e com referência na bibliografia atual.

3.3.2 Granulometria das misturas

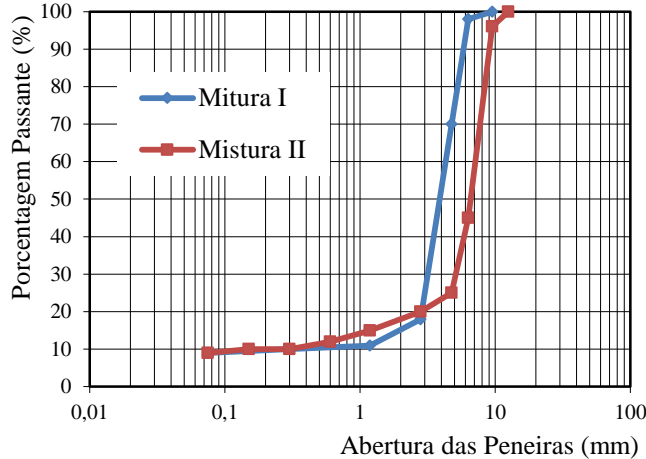
Para a dosagem da mistura asfáltica que propiciaria um revestimento silencioso foram definidas duas curvas granulométricas de acordo com os critérios da literatura internacional que apresentam maior potencial para redução do ruído. O Quadro 3.1 mostra a granulometria para as duas misturas e a Figura 3.5 ilustra as duas curvas granulométricas.

Quadro 3.1 - Granulometrias das misturas de baixo ruído

Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)	
	Mistura I	Mistura II
9,5	100	100
6,3	100	45
4,75	70	25
2,8	18	20
1,18	11	15
0,6	11	12
0,3	10	10
0,15	10	10
0,075	9	9
% volume de vazios (esperado)	16,0%	15,0%

Fonte: Adaptado de Sandberg *et al.* (2011).

Figura 3.5 - Curvas granulométricas das misturas de baixo ruído

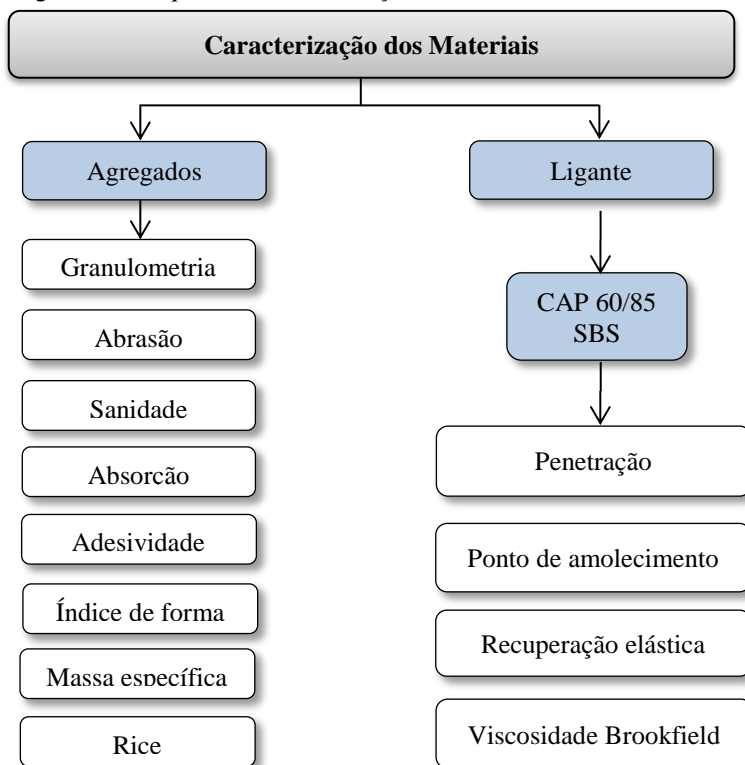


Fonte: Adaptado de Sandberg *et al.* (2011).

3.3.3 Caracterização dos materiais

Nessa etapa foram caracterizados os materiais necessários para a dosagem da mistura asfáltica de baixa emissão de ruído. A Figura 3.6 apresenta o esquema da caracterização dos materiais.

Figura 3.6 - Esquema da caracterização dos materiais.



3.3.3.1 Agregados

Os agregados que foram utilizados na moldagem dos corpos de prova para a dosagem da mistura asfáltica de baixo ruído são de origem granítica provenientes da pedreira da empresa SETEP Construções S/A localizada no município de Paulo Lopes-SC. Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização tecnológica:

- Granulometria (DNER-ME 083/98);
- Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98);

- Sanidade (DNER-ME 089/94);
- Ensaio de absorção (DNER-ME 081/98);
- Adesividade (DNER-ME 078/94);
- Massa específica do agregado graúdo (DNER-ME 081/98);
- Massa específica de agregado miúdo (DNER-ME 084/95);
- Rice (AASHTO T 209);
- Índice de forma (ABNT – NBR 6954).

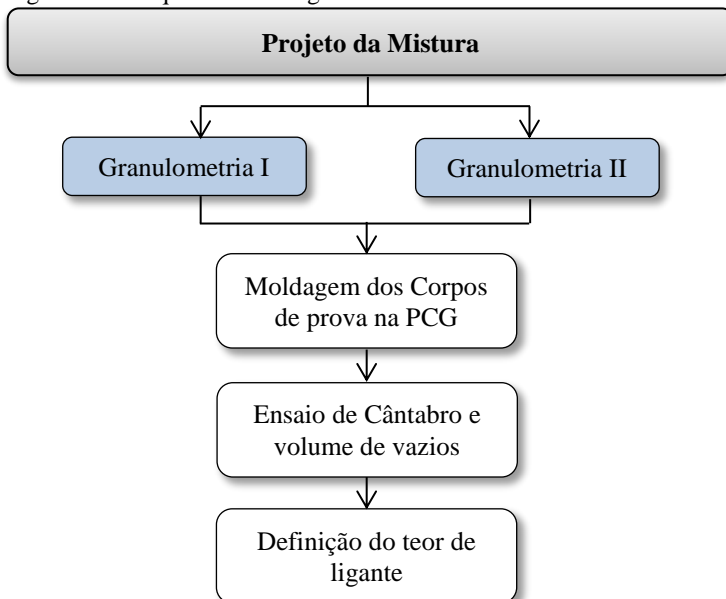
3.3.3.2 Ligante asfáltico

Foi utilizado o ligante asfáltico CAP 60/85 (modificado com SBS) para a dosagem da mistura asfáltica. Foram realizados ensaios de penetração (DNIT 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT 131/2010), viscosidade Brookfield (ABNT NBR 15184) e recuperação elástica (ASTM D 6084).

3.3.4 Projeto da mistura

De acordo com a literatura internacional, de uma forma geral, a mistura asfáltica de baixo ruído deve ser porosa e a sua textura a mais negativa possível para que os mecanismos de geração do ruído não sejam acionados. A Figura 3.7 ilustra o esquema da dosagem da mistura.

Figura 3.7 - Esquema da dosagem da mistura.



As dosagens das duas misturas asfálticas de baixo ruído foram realizadas utilizando-se a prensa compactadora giratória (PCG) SuperPave, em inglês, "Superpave Gyrotory Compaction (SGP)". O equipamento é da marca IPC Global Servopac.

Para a dosagem de uma mistura porosa não existe um método normativo. Com isso, buscou-se na literatura as diretrizes para a determinação do teor de projeto do ligante.

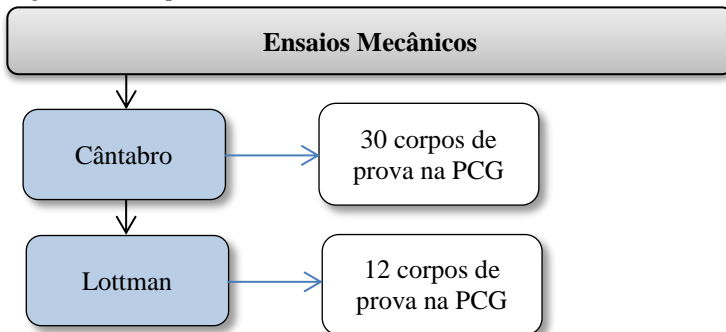
Os corpos de prova foram compactados na PCG com 50 giros, pressão vertical de 600 kPa, ângulo de giro de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ e velocidade de giro de 30 rpm para um corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 63 mm de altura, aproximadamente, pois de acordo com a NCHRP (2009), Schaus (2007), Putman (2012), Estakhri *et al.* (2007) e a ASTM D7064 (2013), essa é a situação que mais representa a compactação de uma mistura porosa com 50 golpes por face no compactador Marshall.

Para cada mistura foram avaliados 5 teores de ligantes (5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5). Foram moldados três corpos de prova para cada teor de ligante e determinado o volume de vazios utilizando-se o método de ensaio DNER-ME 117/94. Posteriormente, foi executado o ensaio de Cântabro (vide item 3.3.4.1). O teor de ligante de projeto de cada mistura foi aquele com o resultado satisfatório no ensaio de Cântabro e que ainda apresentou uma porcentagem de volume de vazios próximo ao recomendado pela literatura internacional para cada granulometria (de 15 a 18%). Caso isso não ocorresse, voltar ia-se para o item 3.3.2.

3.3.4.1 Ensaios mecânicos e de Perda de Massa

Foram realizados os ensaios de Cântabro (perda de massa) para a determinação do teor de ligante de projeto. Posteriormente, foram moldados corpos de prova no teor ótimo para a realização do ensaio resistência à tração. Foi também realizado o ensaio de Lottman para avaliar o dano por umidade induzida. A Figura 3.8 ilustra o esquema dos ensaios mecânicos.

Figura 3.8 - Esquema dos ensaios mecânicos.



a) Ensaio de Cântabro

O ensaio de Cântabro foi realizado de acordo com a especificação DNER-ME 383/99 para a determinação do teor ótimo de ligante das misturas porosas de acordo com o item 3.3.4. Este ensaio avalia a perda de massa (ou resistência à desagregação) das misturas porosas submetidas ao aparelho de abrasão Los Angeles, compactadas pela metodologia Marshall. O desgaste máximo admitido será de 20% de acordo com ASTM D7064 (2013).

b) Ensaio de Lottman modificado

A determinação do dano por umidade induzida para cada mistura foi realizado segundo a norma AASHTO T 283, a qual prevê a moldagem de seis corpos de prova Marshall com volume de vazios de $7,0 \pm 0,5\%$, para cada tipo de mistura.

Entretanto, segundo a NCHRP (2009), por se tratar de uma mistura porosa, os corpos de prova foram moldados no compactador Giratório com o molde de 10 cm no teor de ligante ótimo, controlando-se a altura do corpo de prova (número de giros) para que se atinja a mesma porcentagem de volume de vazios da dosagem da mistura. Nos corpos de prova destinados ao condicionamento, foi realizado um ciclo (saturação (70%), congelamento a -18°C (16 horas) e banho maria a 60°C (24 horas)) ao invés de cinco como prevê ASTM D 7064.

Uma pesquisa realizada pela National Center for Asphalt Technology (NCAT) indicou que as misturas porosas devem ser testadas em condições mais severas. Portanto, o número de ciclos no Teste Lottman Modificado deve ser aumentado (MALLICK, 2000 *apud* SCHAUS, 2007). Entretanto, em um estudo mais recente, descobriu-se que não existe diferença na resistência à tração quando o corpo de prova

é submetido a um, três ou cinco ciclos no ensaio de Lottman (WATSON *et al.*, 2004 *apud* LU *et al.* 2010).

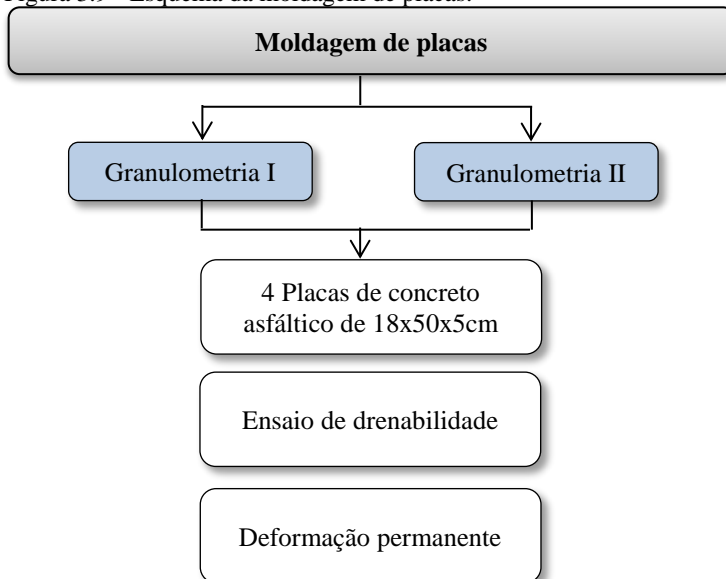
As duas granulometrias já preveem a adição de um aditivo melhorador de adesividade na proporção de 0,3% da massa do ligante asfáltico. A relação entre a resistência média dos corpos de prova condicionados com a resistência dos corpos de prova não condicionados deverá ser maior a 0,8.

3.3.5 Moldagem das placas

Foram confeccionadas duas placas para cada mistura asfáltica no teor de ligante considerado ótimo, utilizando-se o compactador de placas LCPC, de acordo com a norma Francesa AFNOR NF P-98-250-2. Visto que o compactador possui apenas pneus e por se tratar da compactação de uma mistura porosa, tendo ainda como objetivo uma textura negativa, foi utilizada uma chapa metálica para simular a compactação em campo, a qual é realizada apenas com o rolo de chapa liso e sem vibração.

Os moldes utilizados foram de 18x50 cm com altura de 5 cm. O objetivo desta moldagem foi a realização dos ensaios de drenabilidade e de deformação permanente. A Figura 3.9 ilustra o esquema da moldagem de placas.

Figura 3.9 - Esquema da moldagem de placas.



3.3.5.1 Ensaio de drenabilidade

O ensaio de drenabilidade foi realizado utilizando o drenômetro (Figura 3.10) construído no Laboratório da Escuela de Caminos de Santander na Universidade de Cantabria na Espanha (NLT-327/00).

Figura 3.10 - Drenômetro.



Fonte: Autor (2016).

3.3.5.2 Ensaio de deformação permanente

O ensaio de deformação permanente foi realizado de acordo com a norma NF P 98-253-1 (AFNOR, 1991). Foram aplicados 30.000 ciclos (60.000 passadas do pneu) nas placas a uma temperatura de 60°C em que o limite aceitável à deformação permanente obtida no simulador de tráfego é de 10%. Entretanto, esse limite admissível de deformação permanente é definido para os carregamentos da frota veicular da França, onde o eixo padrão de solicitação é 130 kN. No Brasil, a carga legal atualmente chega a 110 kN. Sendo assim, o ensaio retrata uma condição mais severa para as rodovias brasileiras.

O ensaio ocorre a uma frequência de 1 Hz, onde cada ciclo corresponde a duas passadas do pneu que possui um carregamento de 5 kN com pressão dos pneus de 0,6 MPa. A deformação é medida em 15 pontos distintos da placa e a média destas medidas é comparada com a média das leituras iniciais (ciclo zero).

Esse ensaio é de extrema importância visto que as misturas de baixo ruído são utilizadas como camadas de rolamento de pequena espessura assentadas sobre uma camada de mistura asfáltica densa. Com isso praticamente apenas as forças de compressão são atuantes nessa camada.

3.3.6 Ensaio de absorção sonora

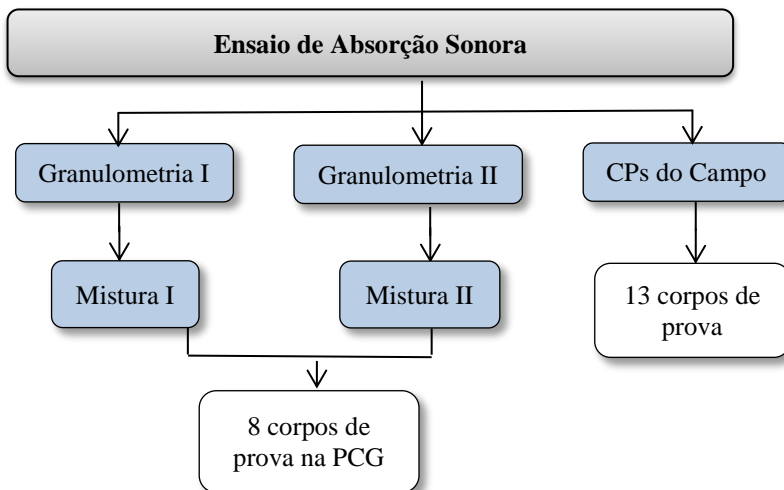
Definido o teor de ligante de projeto de cada mistura asfáltica de acordo com o ensaio de Cântabro e ainda aferido para os demais critérios mecânicos (ensaio de lottman e deformação permanente) foi realizada a otimização da capacidade de absorção sonora para cada mistura.

Foram moldados quatro corpos de prova de cada mistura na PCG no teor de ligante de projeto com espessuras diferentes (2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 cm). A compactação foi realizada no molde de 10 cm com o número de giros necessários para obter o volume de vazios de projeto já determinado.

Os ensaios de absorção sonora foram realizados com o objetivo de determinar a curva de absorção sonora em função da frequência. Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento especificado na ISO 10534-2:1998 E. O ensaio é realizado utilizando-se um tubo de impedância em que é emitido um ruído branco e medido a pressão sonora em seu interior. O sistema funciona emitindo uma pressão sonora incidente e medindo uma pressão sonora refletida pelo material, cuja diferença entre elas é a energia absorvida pelo material. A razão entre a energia acústica absorvida e a energia acústica incidente determina o coeficiente de absorção sonora.

Também foram realizados os ensaios de absorção sonora em corpos de prova extraídos dos segmentos de mistura porosas da Etapa 2. A Figura 3.11 mostra o esquema do ensaio de absorção sonora dos corpos de prova moldados em laboratório.

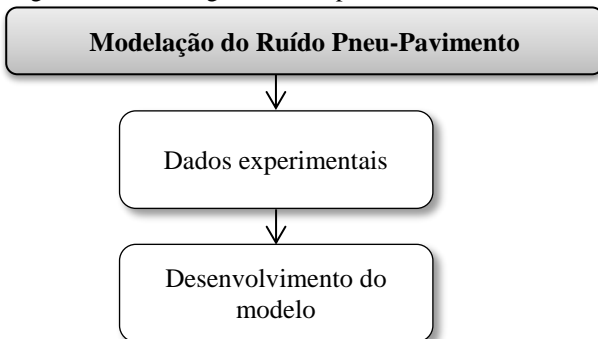
Figura 3.11 - Esquema do ensaio de absorção sonora.



3.4 ETAPA 4 – Modelação do Ruído Pneu-Pavimento

Essa etapa mostra o desenvolvimento de um modelo que visa prever o ruído resultante da interação pneu-pavimento através do conhecimento das propriedades básicas dos materiais e das características das superfícies dos pavimentos. O modelo poderá ser usado por projetistas possibilitando a eles prever uma estimativa do ruído pneu-pavimento do projeto das misturas asfálticas. A Figura 3.12 mostra o fluxograma desta etapa.

Figura 3.12 - Fluxograma da etapa 4.



3.4.1 Dados experimentais

Os dados dos níveis de pressão sonora dos revestimentos dos pavimentos foram retirados das medições em campo realizadas na Etapa 2 com o Trailer-CPX. Para a construção do modelo de previsão do ruído pneu-pavimento foram investigadas as propriedades das misturas asfálticas e caracterizadas as superfícies dos revestimentos estudados.

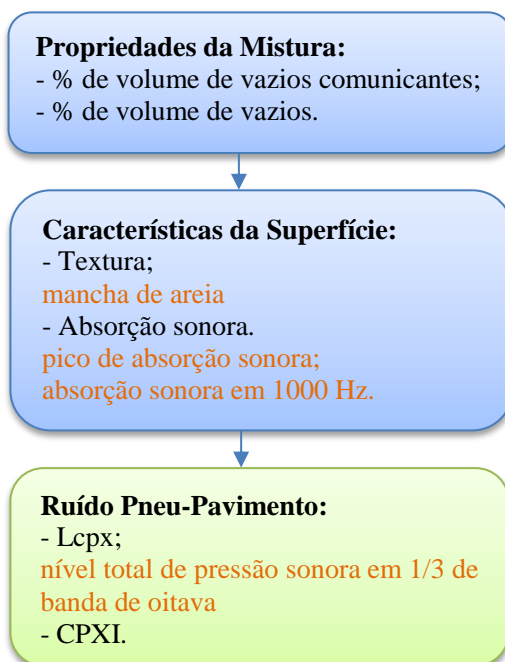
Os dados das propriedades das misturas foram coletados dos órgãos responsáveis das rodovias estudadas (DNIT-SC e Deinfra-SC) e as superfícies caracterizadas através do ensaio de mancha de areia para as misturas densas e de absorção sonora para a mistura porosa.

3.4.2 Desenvolvimento do modelo

O modelo para a previsão do ruído gerado pela interação pneu-pavimento foi construído através da regressão usando-se dados de laboratório e as medições realizadas em campo com o Trailer-CPX.

Os níveis de pressão sonora foram preditos pela combinação das propriedades das misturas e das características da superfície do revestimento. O diagrama da Figura 3.13 mostra a estrutura de modelação com um resumo da entrada e saída para o modelo.

Figura 3.13 - Estrutura da modelação do ruído pneu-pavimento.



CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos em cada etapa da pesquisa.

4.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TRAILER-CPX

4.1.1 Visita aos centros de pesquisas e empresas

Os centros de pesquisas e as empresas especializadas na medição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento da Europa foram visitadas no mês de março de 2011.

a) Universidade Politécnica de Gdansk

O primeiro centro de pesquisa visitado foi o da Universidade Politécnica de Gdansk na Polônia. Foram realizadas reuniões com os professores Dr. Jerzy Ejsmont e o Dr. Piotr Mioduszewski no Departamento de Engenharia Mecânica. Após as reuniões, alguns equipamentos utilizados para a medição do ruído pneu-pavimento foram apresentados: o equipamento Drum-DR (Método de laboratório do tambor) e o Trailer-CPX.

O tambor giratório (Drum-DR) é utilizado para a avaliação do ruído produzido pela interação pneu-pavimento em laboratório. O equipamento consiste em um cilindro de aproximadamente 3,60 metros de diâmetro, que contém amostras de superfície do revestimento coladas no tambor com uma resina epóxi. A Figura 4.1 mostra o equipamento da Drum-DR da Universidade Politécnica de Gdansk.

Figura 4.1 - Tambor giratório da Universidade Politécnica de Gdansk.



Fonte: Autor (2011).

O Trailer-CPX da Universidade Politécnica de Gdansk apresenta apenas um pneu para medição do ruído gerado da interação pneu-pavimento. O pneu de referência fica localizado no centro do eixo do Trailer e apresenta algumas vantagens em relação ao Trailer-CPX de dois pneus, são elas: largura e peso menores e quantidade menor de microfones. Entretanto tem como desvantagem a não possibilidade de se medir o ruído pneu-pavimento na trilha de roda, pois o pneu fica posicionado fora da trilha de roda, além de apresentar pouca estabilidade na parte traseira do Trailer. A Figura 4.2 mostra o Trailer-CPX de um pneu da Universidade Politécnica de Gdansk.

Figura 4.2 - Trailer-CPX de um pneu.



Fonte: Autor (2011).

b) Universidade Tecnológica de Delft

O segundo centro de pesquisa visitado foi o da Universidade Tecnológica de Delft. Foram realizadas reuniões com o Dr. André Molenaar, o Dr. Wim van Keulen e o Dr. Mingliang LI, que na época era aluno de doutorado. Mingliang LI apresentou uma palestra sobre o ruído da interação pneu-pavimento e alguns equipamentos que estavam sendo utilizados na sua tese: o perfilômetro a laser e o equipamento de absorção sonora.

A Figura 4.3 mostra o perfilômetro a laser utilizado por Mingliang LI para caracterizar a textura dos revestimentos asfálticos através do MPD (Mean Profile Depth). O aparato consegue se mover na direção transversal e longitudinal coletando os dados em intervalos 0,1mm.

Figura 4.3 - Perfilômetro a laser.



Fonte: Autor (2011).

O equipamento para medição do coeficiente de absorção sonora, em inglês, “*Microflow Surface Impedance*”, foi utilizado por Mingliang LI em amostras de laboratório e nos revestimentos do pavimento em campo. A Figura 4.4 mostra o equipamento.

Figura 4.4 - Aparato para medição do coeficiente de absorção.



Fonte: Autor (2011).

c) Empresa de Consultoria VanKeulen Advies

Nessa visita, o Dr. Wim van Keulen, dono da empresa, apresentou os seus dois últimos Trailers-CPX de dois pneus desenvolvidos. A empresa presta consultoria para o governo Holandês, verificando, com o Trailer-CPX, a qualidade acústica dos revestimentos do país. Na Holanda, o primeiro critério de escolha do revestimento do pavimento é a capacidade que o mesmo tem de reduzir o ruído gerado pela interação pneu-pavimento. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram os Trailers-CPX da Empresa VanKeulen Advies.

Figura 4.5 - Trailer-CPX de dois pneus.



Fonte: Autor (2011).

Figura 4.6 - Trailer-CPX de dois pneus.



Fonte: Autor (2011).

d) Empresa M+P-Consulting Engineers

A segunda empresa visitada foi a consultora alemã M+P. A principal atividade da empresa é relacionada com o estudo e a medição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento. Assim como a Consultoria VanKeulen Advies, a M+P também presta consultoria para o governo Holandês, verificando, através do Trailer-CPX, a qualidade acústica dos revestimentos do pavimento. Foram realizadas reuniões com Dr. Gijsjan van Blokland sobre as atividades realizadas pela empresa e, em seguida, o Trailer-CPX de dois pneus foi apresentado. No entanto, não foi permitido tirar fotos da Trailer-CPX. A Figura 4.7 mostra apenas as fotos dos pneus de referência do Trailer-CPX.

Figura 4.7 - Pneus de referência do Trailer-CPX da M+P Consulting Engineers.



Fonte: Autor (2011).

e) Empresa Breijn B.V. Engenharia

Também foi realizada uma visita à empresa construtora Breijn B.V. Engenharia. A empresa tem larga experiência na construção de pavimentos de baixo ruído na Holanda.

No laboratório da empresa, foram apresentados alguns equipamentos utilizados na caracterização do desempenho mecânico de uma mistura asfáltica, entre eles, o ensaio de resistência à abrasão RSAT (Rotating Surface Abrasion Test). O ensaio consiste, primeiramente, na compactação das amostras com um rolo padronizado conforme a Figura 4.8.

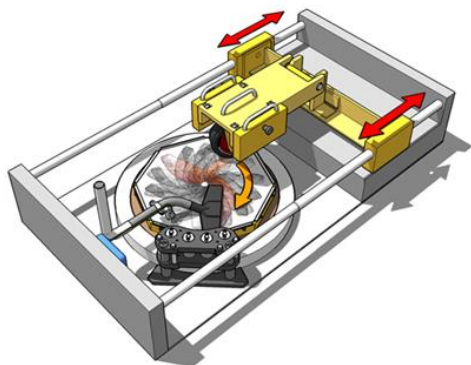
Figura 4.8 - Rolo compactador das amostras de laboratório.



Fonte: Autor (2011).

Em seguida, uma roda padronizada percorre a superfície da amostra em ciclos, enquanto a amostra é rotacionada a uma determinada frequência. O ensaio verifica a perda de massa da amostra em 24 horas de teste. A Figura 4.9 mostra o esquema do ensaio e a Figura 4.10, o equipamento da empresa Breijn B.V. Engenharia.

Figura 4.9 - Esquema do equipamento RSAT.



Fonte: Breijn B.V. Engenharia (2011).

Figura 4.10 - Equipamento RSAT da empresa Breijn B.V. Engenharia.



Fonte: Autor (2011).

f) CEDEX

Por fim, foi realizada a visita ao centro de pesquisa Cedex, na Espanha. O Cedex vem medindo ruído gerado pela interação pneu-pavimento na Espanha utilizando o Trailer-CPX de dois pneus, que foi fabricado com a ajuda do Dr. Wim van Keulen. A Figura 4.11 mostra o Trailer-CPX do Cedex.

Figura 4.11 - Trailer-CPX do Cedex.



Fonte: Autor (2011).

O diâmetro dos pneus de referência do Trailer são 10 cm menores do que o pneu utilizado para o deslocamento do equipamento. Isto é necessário para que a carenagem do Trailer fique apenas a 4 cm do chão quando são feitas as medidas do ruído. Quando o equipamento é transportado de uma rodovia para outra, troca-se o pneu. Com isso, o Trailer fica a 9,0 cm do chão evitando danos na carenagem do equipamento devido às imperfeições das superfícies das rodovias. A Figura 4.12 mostra os pneus de referência do Trailer-CPX do Cedex.

Figura 4.12 - Pneus de referência do Trailer-CPX. (a) AVON, (b) SRTT



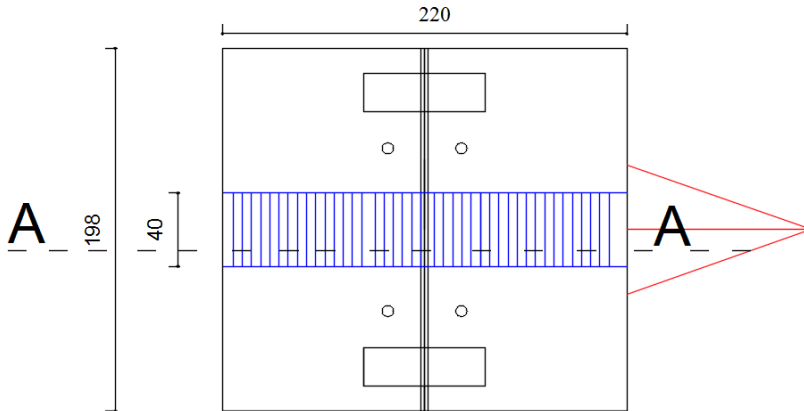
Fonte: Autor (2011).

4.1.2 Projeto do Trailer-CPX

Com o conhecimento adquirido durante as visitas aos centros de pesquisas e empresas especializadas na medição do ruído pneu-pavimento da Europa, foi possível a elaboração do projeto do Trailer-CPX. O projeto seguiu as diretrizes da norma ISO 11819-2 (2010), tendo como referência

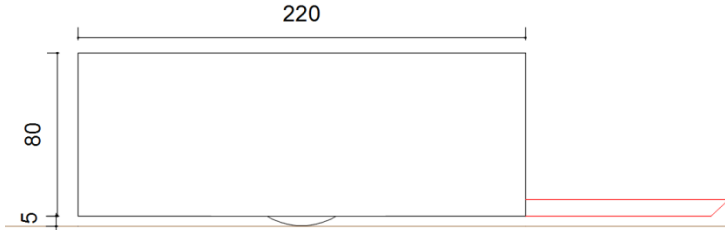
o modelo do Trailer-CPX da empresa VanKeulen Advies. As Figuras 4.13 e 4.14 mostram o projeto do Trailer com as cotas em centímetros.

Figura 4.13 - Planta baixa do projeto do Trailer-CPX.



Fonte: Autor (2011).

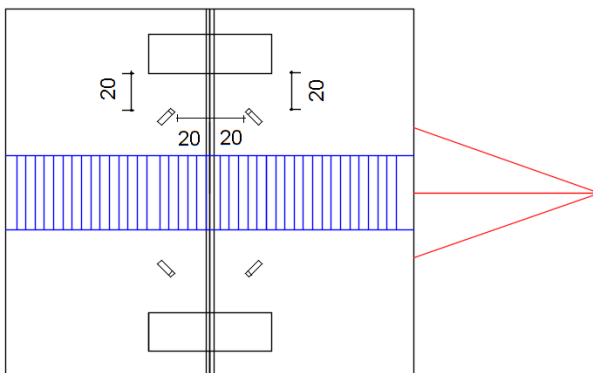
Figura 4.14 - Vista lateral do projeto do Trailer-CPX.



Fonte: Autor (2011).

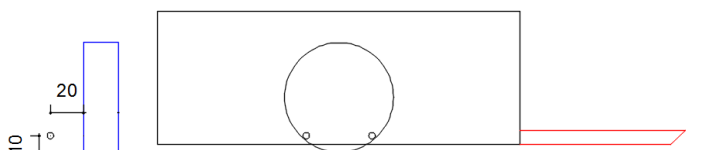
O Trailer foi projetado para que os 4 microfones das medições pudessem ser acoplados a 20 cm do chassi e a 20 cm do pneu, com altura de 10 cm do chão. Também foi previsto um espaço para a colocação das espumas de alta absorção sonora (vide item 4.1.4). As Figuras 4.15 e 4.16 mostram as posições dos microfones.

Figura 4.15 - Posição dos microfones em planta.



Fonte: Autor (2011).

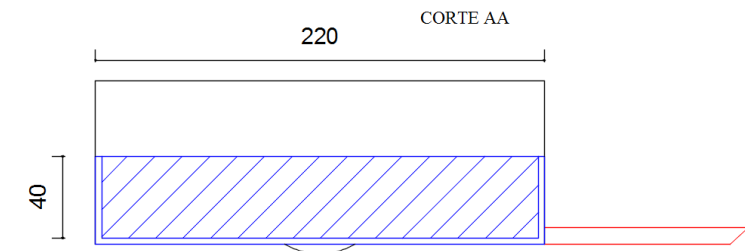
Figura 4.16 - Posição dos microfones em vista lateral.



Fonte: Autor (2011).

A norma ISO 11819-2 (2010) determina que o Trailer tenha carga de 320 kg por pneu. Para que o Trailer conseguisse esse valor de carregamento foi projetado um compartimento para a colocação de carga. É possível verificar esse compartimento na Figura 4.13. A Figura 4.17 mostra o compartimento projetado do corte AA.

Figura 4.17 - Compartimento para colocação de carga.



Fonte: Autor (2011).

4.1.3 Construção do Trailer-CPX

A construção do Trailer-CPX foi possível com os recursos fornecidos pelo CNPq através do Projeto de pesquisa: Quantificação dos ruídos provocados pelo acoplamento pneu/revestimento das rodovias aplicada ao planejamento de transporte, número 402378/2009-1.

O Trailer foi construído pela empresa Império Reboques Ltda., especializada na construção de Trailers, que seguiu totalmente o projeto de execução. Entretanto, durante e após a construção do Trailer, foi necessário realizar várias modificações para ajustes.

A carenagem do Trailer foi construída sobre um eixo com um sistema de amortecedores e molas de um carro do tipo Peugeot. As Figuras 4.18 e 4.19 mostram o Trailer-CPX durante a construção.

Figura 4.18 - Construção do Trailer.



Fonte: Autor (2011).

Figura 4.19 - Pintura da carenagem do Trailer.



Fonte: Autor (2011).

A construção do Trailer-CPX teve o acompanhamento do Dr. Wim van Keulen. O Trailer é semelhante ao construído pelo Dr. van Keulen na sua empresa na Holanda. A Figura 4.20 mostra a visita do Dr. Wim van

Keulen na oficina da empresa Império Reboques Ltda. durante a construção do Trailer.

Figura 4.20 - Visita técnica do Dr. Wim van Keulen.



Fonte: Autor (2011). (da esquerda para direita: Autor, Dr. Samir Nagi Yousri Gerges, Dr. Wim van Keulen, Dr. Joe Arnaldo Villena).

Além do acompanhamento da construção do Trailer-CPX, o Dr. Wim van Keulen aproveitou para realizar um workshop internacional no Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 4.21). Sendo abordados os seguintes assuntos:

- introdução ao problema de ruído nas rodovias;
- o incômodo causado pelo ruído dos veículos;
- mecanismos de geração do ruído causado pelo tráfego dos veículos;
- métodos de medição do ruído;
- tipos de pavimentos de baixa emissão de ruído;
- dimensionamento de pavimentos de baixa emissão de ruído.

Figura 4.21 - Workshop internacional sobre o ruído gerado pela interação pneu-pavimento.



Fonte: Autor (2011). (da esquerda para direita: Dr. Samir Nagi Yousri Gerges, Dr. Glicério Trichês, Dr. Wim van Keulen, Autor, Dr. Joe Arnaldo Villena, Eng. Civil Luis Fernando Franken).

Finalizada a estrutura do Trailer, foi realizada a colocação das espumas de alta absorção sonora no interior da carenagem (Figura 4.22) e posicionadas as hastes onde são instalados os microfones para as medições.

Figura 4.22 - Colocação das espumas de alta absorção sonora.



Fonte: Autor (2012).

Na Figura 4.22 é possível verificar que a carenagem do Trailer ficou muito acima do chão, devido a problemas construtivos, não atendendo a altura prevista de 5 cm do chão. Com isso, foi necessária a construção de uma saia removível de acordo com a Figura 4.23.

Figura 4.23 - Colocação da saia removível.



Fonte: Autor (2012).

Apesar de não se ter seguido o projeto executivo, a solução foi interessante, pois, quando o equipamento é transportado de uma rodovia para outra, retira-se a saia. Com isso, a carenagem fica a 50 cm do chão evitando danos ao Trailer devido às imperfeições da superfície das rodovias brasileiras.

Finalizada a construção do Trailer-CPX (ainda sem os pneus de referência), foi possível apresentá-lo ao especialista do ruído gerado pela interação pneu-pavimento, o Dr. Ulf Sandberg, pois, o mesmo participava do Congresso Internacional SAE Brasil (International Noise and Vibration Colloquium) que era realizado em Florianópolis em Novembro de 2012. A Figura 4.24 mostra o Dr. Ulf Sandberg ao lado do Trailer-CPX.

Figura 4.24 - Trailer-CPX.



Fonte: Autor (2012). (da esquerda para direita: Dr. Joe Arnaldo Villena, Dr. Samir Nagi Yousri Gerges, Dr. Ulf Sandberg, Autor).

Com a chegada dos pneus de referência foi verificado que os mesmos não encaixavam no eixo do Trailer projetado. Com isso, todo o sistema de amortecedor e molas foi trocado para que os dois tipos de pneus de referência pudessem se encaixar no eixo do Trailer. A Figura 4.25 mostra o Trailer com um dos pneus de referência.

Figura 4.25 - Colocação do pneu de referência.



Fonte: Autor (2014).

No entanto, o novo sistema de molas instalado se mostrou muito rígido, gerando um sistema massa-mola e amortecedor ineficaz, fazendo com que o Trailer pulasse constantemente durante o seu deslocamento pela rodovia. Foi necessária então a troca das molas por outras mais longas e menos rígidas para que o sistema tivesse uma frequência fundamental próxima a 3 Hz (frequência na qual os veículos trabalham). Isto exigiu todo um novo sistema de fixação do eixo no chassi do Trailer. A Figura 4.26 mostra as novas molas instaladas.

Figura 4.26 - Trailer-CPX finalizado.



Fonte: Autor (2015).

Para verificar se o sistema massa-mola e amortecedor proporcionava uma frequência ideal para a locomoção do Trailer, foram instalados dois acelerômetros na sua carenagem.

O ensaio consistiu em aplicar uma carga na estrutura do Trailer e medir as acelerações verticais de resposta da estrutura, por meio de dois acelerômetros da marca HBM modelo 2210-002, instalados na parte superior do Trailer alinhados ao eixo, um de cada lado (Figura 4.27), e ligados a um microcomputador por meio de um sistema de aquisição de dados da marca MGC-Plus, com 6 canais para acelerômetros.

Através destas medidas, foram se acertando os comprimentos das molas bem como o número de molas para que a frequência fundamental do Trailer ficasse ao redor de 3 Hz.

Figura 4.27 - Acelerômetros instalados no Trailer.



Fonte: Autor (2015).

Os dados das acelerações foram obtidos no domínio do tempo e para se obterem as frequências naturais do Trailer, esses dados foram transformados para o domínio da frequência por meio do algoritmo da FFT (transformada rápida de Fourier) desenvolvida por Junges (2010) em uma linguagem de programação simbólica. Foram realizados 4 testes e as Figuras 4.28 a 4.31 mostram os resultados do ensaio. Os espectros de resposta indicam que após o ajuste do comprimento, rigidez e quantidade do “feixe de molas”, o Trailer responde basicamente na frequência fundamental, próxima a 3,0 Hz, sendo essa uma frequência ideal para locomoção do Trailer e medição do ruído resultante da interação pneu-pavimento.

Figura 4.28 - Espectro de aceleração (teste 01).

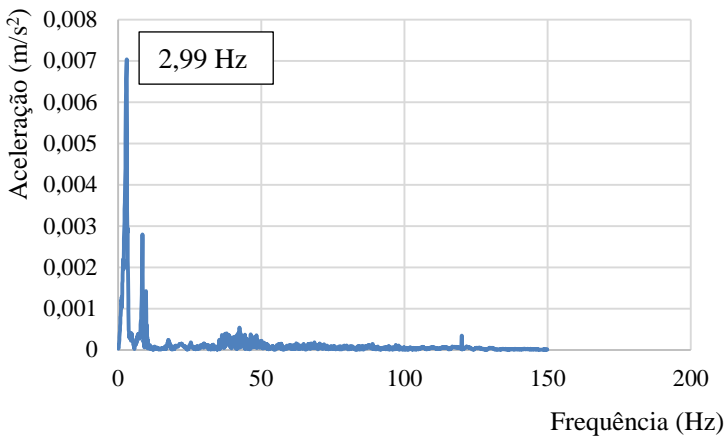


Figura 4.29 - Espectro de aceleração (teste 02).

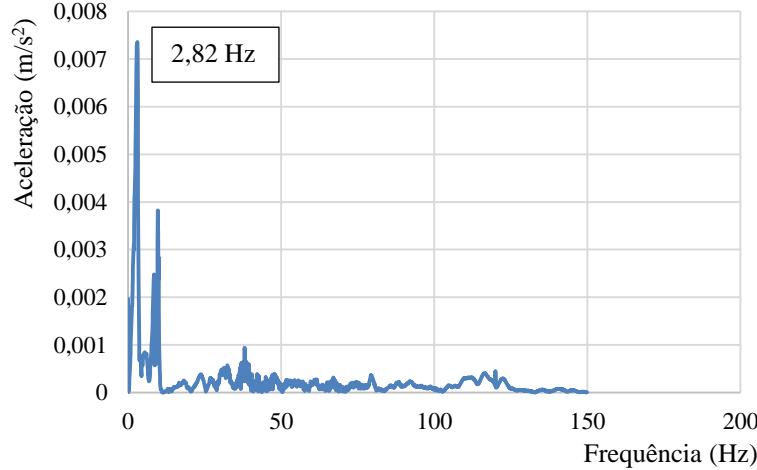


Figura 4.30 - Espectro de aceleração (teste 03).

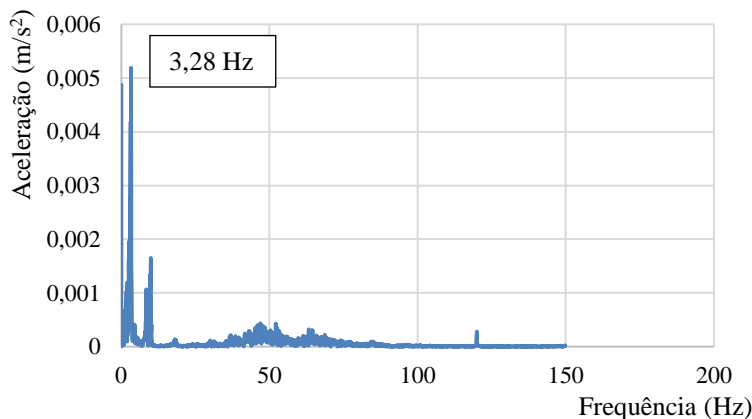
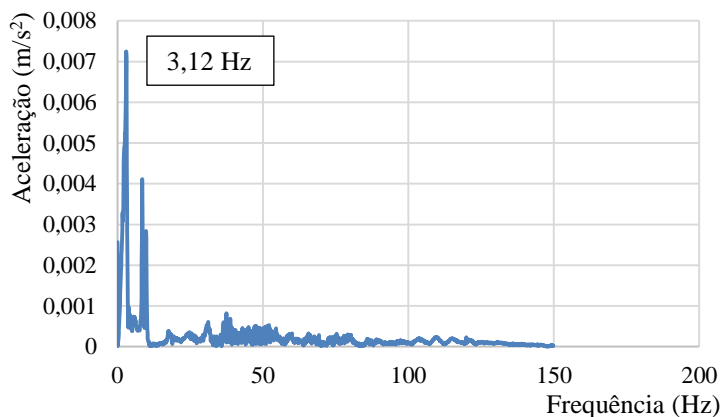


Figura 4.31 - Espectro de aceleração (teste 04).



Para finalizar, foram instalados dois para-lamas removíveis no intuito de evitar a colmatação das espumas do Trailer-CPX durante os deslocamentos entre as rodovias estudadas em dias de chuva. Durante as medições do ruído pneu-pavimento, os para-lamas são removidos. A Figura 2.32 mostra o para-lama colocado no Trailer-CPX.

Figura 4.32 - Para-lama do Trailer-CPX.



Fonte: Autor (2015).

4.1.4 Certificação do Trailer-CPX

Para a realização das medições do ruído pneu-pavimento e da certificação do Trailer foram adquiridos: 6 microfones (4 são utilizados e 2 são reservas), um par de cada pneu de referência, espumas de alta absorção sonora, um computador e um analisador de dados.

Os microfones são da marca G.R.A.S. (Figura 4.33), o computador é da marca Dell e o analisador de dados utilizado é o 01dBsuite (Figura 4.34). A capacidade de absorção sonora da espuma utilizada (Figura 4.35) foi verificada utilizando-se o método do tubo de impedância.

Figura 4.33 - Microfones para o Trailer-CPX.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.34 - Analisador de dados.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.35 - Espuma de alta absorção sonora.



Fonte: Autor (2015).

Para que o Trailer pudesse realizar os ensaios em campo do ruído gerado pela interação pneu-pavimento foram realizados os testes de certificação do Trailer-CPX seguindo as diretrizes da ISO 11819-2 (2010):

a) Certificação da Espuma do Trailer.

Foram realizados testes de absorção sonora com o tubo de impedância nas espumas utilizadas no Trailer-CPX. De acordo com a Norma ISO 11819-2 (2010), as espumas devem ter um coeficiente de absorção sonora mínima de 0,6 entre as frequências 315 – 400 Hz e de 0,9 entre as frequências de 500 – 5.000 Hz.

Na espuma utilizada no Trailer foi executada uma película de proteção para que a mesma tenha uma durabilidade maior e que não venha a colmatar e perder sua capacidade de absorção sonora em pouco tempo. A Figura 4.36 mostra os resultados da absorção sonora realizada pelo

fabricante. A espuma utilizada no Trailer é referente a amostra 2 e 3 (J.P.F.-2 e J.P.F.-3).

Figura 4.36 - Coeficiente de absorção sonora fornecido pelo fabricante da espuma.

Medição do Coeficiente de Absorção Sonora (α)

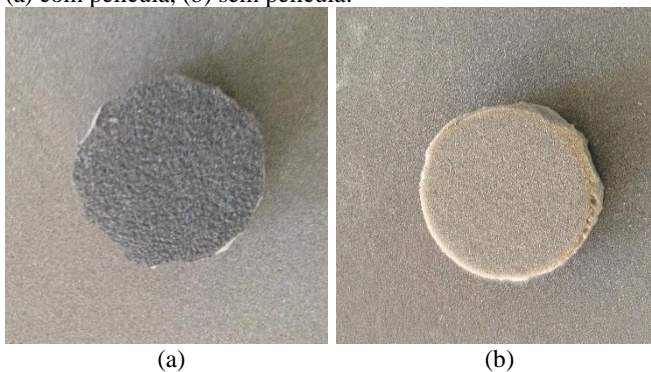
Frequência (Hz)	Absorção Acústicas das amostras				
	(α) Placustic-1	(α) J.P.F.- 2	(α) J.P.- 3	(α) J.L.F.- 4	(α) PU D33- 5
100	0,03	0,11	0,06	0,11	0,12
125	0,01	0,12	0,08	0,16	0,16
160	0,07	0,18	0,13	0,25	0,19
200	0,13	0,24	0,20	0,41	0,29
250	0,10	0,35	0,25	0,57	0,45
315	0,08	0,41	0,33	0,61	0,58
400	0,12	0,45	0,41	0,80	0,62
500	0,23	0,51	0,51	0,91	0,59
630	0,24	0,61	0,70	0,90	0,58
800	0,29	0,53	0,85	0,73	0,60
1000	0,29	0,58	0,84	0,73	0,62
1250	0,31	0,49	0,90	0,70	0,55
1600	0,42	0,56	0,88	0,57	0,59
2000	0,53	0,56	0,82	0,61	0,81
2500	0,62	0,67	0,82	0,57	0,80
3150	0,73	0,59	0,87	0,72	0,67
4000	0,78	0,48	0,96	0,70	0,52
5000	0,79	0,53	0,86	0,47	0,56
6300	0,78	0,44	0,98	0,54	0,43

Amostra 1: Placustic
Amostra 2: Junsorb P com filme
Amostra 3: Junsorb P sem filme
Amostra 4: Junsorb L com filme
Amostra 5: PU D33 com filme

Fonte: Empresa Junseal Espumas Especiais Ltda (2015).

Para a realização do teste do coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância, as espumas foram cortadas com o mesmo diâmetro do tubo (10,0 cm). Foram realizadas medições da capacidade de absorção sonora da espuma com e sem a película de proteção (50 mm). A Figura 4.37 mostra as espumas cortadas com e sem a película de proteção.

Figura 4.37 - Espuma para o teste do coeficiente de absorção sonora (50 mm)
(a) com película, (b) sem película.



Fonte: Autor (2015).

Os testes também foram realizados utilizando duas camadas de espuma (100 mm). A Figura 4.38 mostra a realização do teste e a Figura 4.39 mostra os resultados do coeficiente de absorção sonora em função da frequência para diferentes configurações. Os resultados também foram apresentados em bandas de terço de oitava, conforme Figura 4.40. O Quadro 4.1 mostra os valores dos α para cada frequência de terço de oitava.

Figura 4.38 - Teste de absorção sonora na espuma com o tubo de impedância.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.39 - Resultado do teste de absorção sonora na espuma.

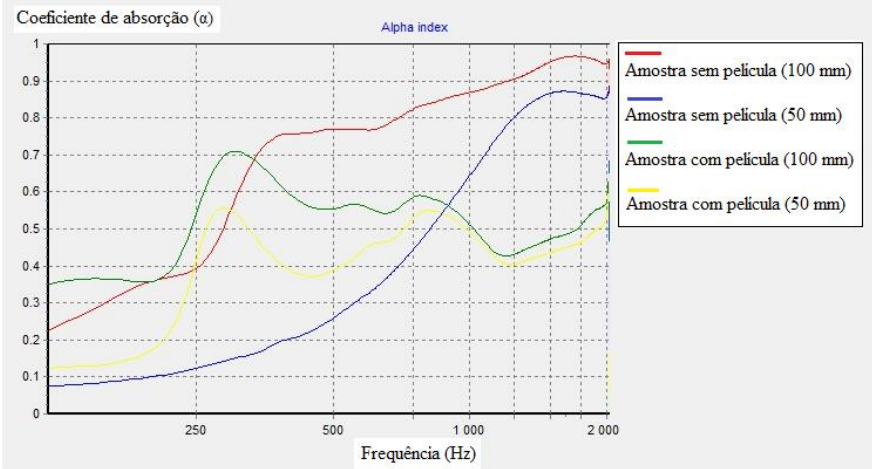
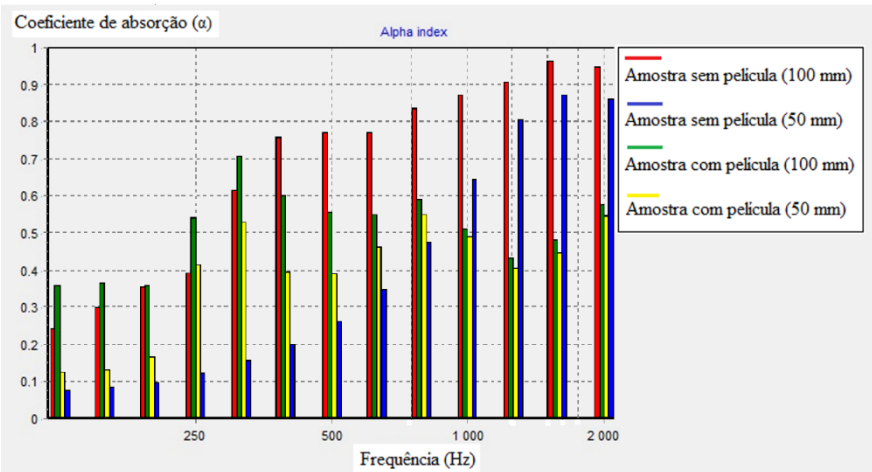


Figura 4.40 - Resultado do teste de absorção sonora na espuma em terço de oitava.



Quadro 4.1 - Valores do coeficiente de absorção para cada frequência de terço de oitava.

Frequência (Hz)	Amostra			
	100 mm		50 mm	
	c/ película	s/ película	c/ película	s/ película
31,5	0,35	0,24	0,13	0,07
63	0,36	0,30	0,14	0,08
125	0,35	0,35	0,16	0,10
250	0,54	0,39	0,41	0,12
315	0,71	0,61	0,52	0,15
400	0,60	0,75	0,40	0,20
500	0,55	0,76	0,39	0,26
630	0,54	0,76	0,46	0,34
800	0,58	0,84	0,55	0,48
1000	0,51	0,87	0,49	0,65
1250	0,43	0,91	0,40	0,80
1600	0,48	0,95	0,44	0,87
2000	0,57	0,94	0,54	0,85

Com os resultados apresentados é possível verificar que apenas a amostra com duas camadas de espuma (100 mm) e sem a película de proteção foi a que obteve os limites próximos do coeficiente de absorção sonora prescritos na ISO 11819-2 (2010). Desta forma, a solução adotada para o Trailer foi a utilização de duas camadas de espumas, totalizando 100 mm, com a película de proteção apenas na região que é atingida por respingos lançados pelos pneus.

b) Teste de Reflexão Sonora

Este teste é realizado para verificar a influência da reflexão do som gerado pelos objetos perto dos microfones de medição, tais como, o eixo do Trailer, o suporte dos microfones e, de uma maneira geral, toda a estrutura do Trailer.

O nível de pressão sonora deve ser medido para banda de terço de oitava nas frequências de 315 a 5.000 Hz, sem a ponderação A. Para que o Trailer seja qualificado neste teste é necessário que a influência da reflexão seja menor que 3 dB.

Para a realização do teste foi utilizada uma fonte sonora para geração de ruído branco. Primeiramente foi realizada a medição com toda a estrutura do Trailer de acordo com a Figura 4.41.

Figura 4.41 - Ensaio de reflexão sonora com a estrutura do Trailer.



Fonte: Autor (2015).

Com a mesma distância da fonte (1 metro) e a mesma distância do microfone e do pneu do teste (15 centímetros) com a estrutura do Trailer foi realizado o ensaio sem a estrutura do mesmo.

Foram realizadas duas medições para cada situação (com e sem a estrutura do Trailer) e calculada a média através da equação 4.1.

$$Lcr_m = 10.\log\left(\frac{1}{2} \sum_{n=01}^{02} 10^{0,1(Lcr_{i,f})}\right) \quad (4.1)$$

onde:

- Lcr_m : nível de pressão sonora médio de 1/3 de oitava de 315 a 5000Hz;
- Lcr : nível de pressão sonora de 1/3 de oitava de 315 a 5000Hz;
- i : número do ensaio;
- f : frequência (frequência central de banda de terço de oitava em Hz).

O tempo de cada medição foi de 20 segundos e os resultados podem ser observados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Resultados do teste da reflexão.

Frequência 1/3 oitava	01 ST	02 ST	Média	01 CT	02 CT	Média	Correção (Cdf)
315	74,0	74,0	74,0	75,1	75,1	75,1	-1,1
400	76,5	76,5	76,5	77,1	76,7	76,9	-0,4
500	73,2	73,1	73,2	75,8	75,8	75,8	-2,6
630	72,2	71,9	72,1	73,2	73,6	73,4	-1,4
800	76,5	76,6	76,6	76,0	76,7	76,4	0,2
1000	80,1	79,8	80,0	80,4	80,1	80,3	-0,3
1250	81,8	81,8	81,8	82,1	81,2	81,7	0,1
1600	80,0	80,1	80,1	81,3	81,0	81,2	-1,1
2000	79,3	79,2	79,3	80,0	80,3	80,2	-0,9
2500	85,0	85,2	85,1	84,1	84,2	84,2	1,0
3150	85,6	85,6	85,6	86,9	87,2	87,1	-1,5
4000	86,6	86,7	86,7	87,9	88,0	88,0	-1,3
5000	81,7	81,6	81,7	82,3	82,3	82,3	-0,6
Total	92,7	92,8	92,7	93,5	93,5	93,5	-0,7

*ST: sem a estrutura do Trailer; CT: Com a estrutura do Trailer.

Os resultados mostraram que a influência da reflexão sonora da estrutura do Trailer não ultrapassou os 3 dB estipulados pela ISO 11819-2 (2010).

c) Teste do Ruído do Veículo de Reboque

O teste consiste em verificar a influência do veículo que irá rebocar o Trailer-CPX na medição do ruído. O teste é realizado com a medida da pressão sonora do microfone mais próximo do veículo de reboque quando o mesmo está com o motor em uma condição de aceleração e quando está em uma situação de marcha lenta. O Trailer-CPX é considerado qualificado se a diferença entre as medições não for maior que 10 dB (A) para um espectro de frequência de 315 a 5000 Hz.

O veículo de reboque utilizado nesta pesquisa é uma Ford Ranger, ano 2015, motor 2.5, a gasolina.

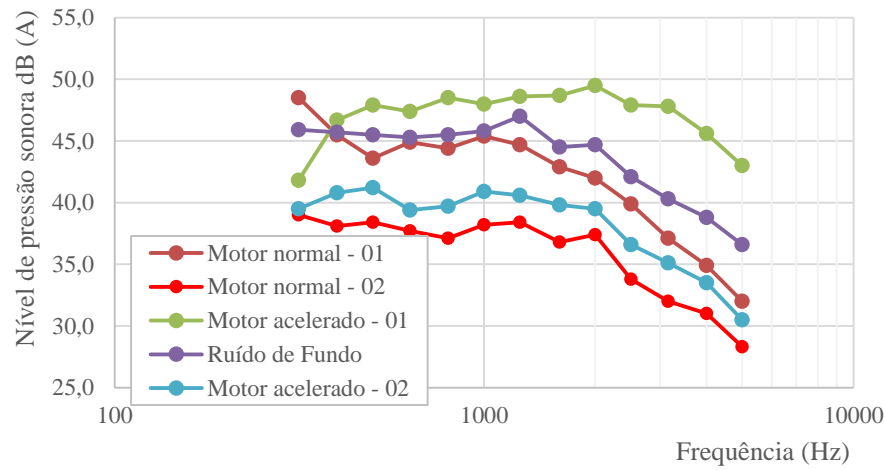
Apesar da verificação realizada nesse teste, o veículo de reboque nunca estará em uma condição de aceleração forçada no momento da realização dos ensaios, e ainda, para as velocidades em que serão realizados os testes com o Trailer-CPX, a influência do ruído do motor no nível de pressão sonora é nulo. A Figura 4.42 mostra a execução do teste com o sistema de aquisição de dados dentro do veículo de reboque com duração do ensaio de 2 minutos. Os resultados são apresentados no Quadro 4.3 e a Figura 4.43 apresenta os resultados em função do espectro da frequência.

Figura 4.42 - Ensaio do teste do ruído do veículo de reboque.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.43 - Resultado do teste do veículo de reboque em função da frequência.



Quadro 4.3 - Resultados do teste do veículo de reboque.

Ensaio do reboque	Rotação do motor (RPM)	NPS (dBA)
Motor acelerando - 01	4000	58,6
Motor acelerando - 02	4000	50,3
Motor normal - 01	700	54,9
Motor normal - 02	700	47,9
Ruído de Fundo	-	55,6

No Quadro 4.3, observa-se que o veículo de reboque não terá qualquer influência na geração do ruído pneu-pavimento. Os ruídos captados pelos microfones foram do tráfego que passava ao lado durante a realização do ensaio (ruído de fundo). Ressaltando-se que o nível de pressão sonora foi calculado através da equação 2.22, ao passo que o valor apresentado, é a soma energética dos níveis de pressão sonora dB(A) entre 315 e 5.000 Hz.

d) Teste do Ruído dos Veículos Externos

Esse teste é considerado o mais importante para a qualificação do Trailer-CPX. Ele verifica a influência dos veículos externos (tráfego normal) na medição do nível de pressão sonora da interação pneu-pavimento. Ou seja, os níveis de pressão sonora medido pelos microfones do Trailer não podem ser influenciados pelo tráfego durante o ensaio.

O teste é realizado colocando-se o Trailer parado no acostamento de uma rodovia em que passem carros em uma velocidade média entre 70-90 km/h. A medição pode ser realizada em uma mistura densa normal em que o nível de pressão sonora é medido pelos dois microfones do pneu mais próximo da via, onde o número mínimo de medidas é de 20 veículos leves e 10 veículos pesados. O resultado é comparado com a medição realizada com o Trailer-CPX no mesmo segmento ou em uma mistura asfáltica semelhante, com velocidade de referência de 80 km/h.

O Trailer é considerado qualificado se a medição realizada com o Trailer em movimento for maior que 10 dB (A) em comparação com os resultados do Trailer no acostamento.

O teste foi realizado na BR-101 em uma mistura asfáltica densa comum no Contorno de Araranguá, no sentido norte. A Figura 4.44 mostra o ensaio sendo realizado. As velocidades dos veículos estavam na Faixa de 70 a 90 km/h e foram medidos os níveis de pressão sonora de 23 veículos leves e 12 veículos pesados. A Figura 4.45 mostra o resultado do ensaio para os dois microfones mais próximos da passagem dos veículos (microfone 3 e 4) e a Figura 4.46 a média dos resultados dos dois microfones.

Figura 4.44 - Teste do ruído dos veículos externos.



Figura 4.45 - Resultado do teste do ruído dos veículos externos.

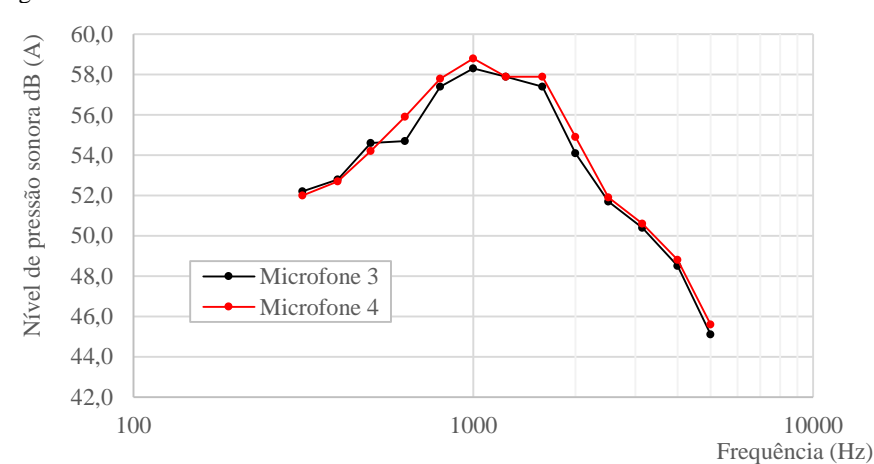
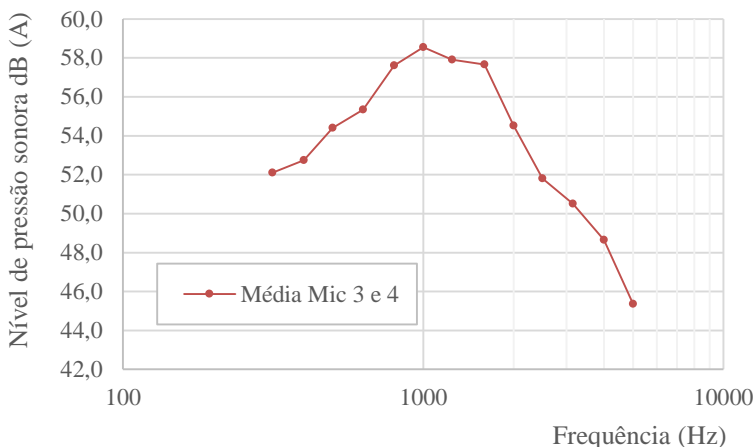


Figura 4.46 - Resultado do teste do ruído dos veículos externos da média dos Microfones 3 e 4.



A média da soma enérgica dos valores de cada frequência do ensaio realizado foi de 66,1 dB (A). O resultado final das medições realizadas com o Trailer-CPX nesse mesmo local (vide item 4.2.4) com velocidade de referência de 80 km/h foi de 97,6 dB (A). Portanto o Trailer pode ser considerado qualificado, pois, os resultados das medições com ele em movimento foram maiores que 10 dB (A) em relação aos resultados com o Trailer parado no acostamento.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO EM RODOVIAS CATARINENSES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização do ruído pneu-pavimento utilizando o Trailer-CPX. Foram escolhidas cinco rodovias catarinenses com diferentes tipos de revestimentos. São apresentados os estudos realizados na Avenida Beira-Mar sobre dois tipos de revestimentos asfálticos (mistura densa comum e mistura com asfalto-borracha) e para diferentes macrotexturas encontradas através do ensaio da mancha de areia. Ainda em Florianópolis, foram realizadas medidas em um pavimento rígido do Túnel Antonieta de Barros e uma mistura asfáltica densa na SC-403. Na BR-101, no Contorno de Araranguá foi realizada a medição sobre uma mistura asfáltica densa comum e um microrrevestimento. Na BR-101 também foram realizadas medidas sobre

uma mistura asfáltica densa, localizada no KM 257 sentido sul, e no pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo, em Paulo Lopes-SC. Também é apresentado as medições sobre uma mistura do tipo gap graded localizada na região de Criciúma e sobre uma camada porosa de atrito localizada na BR-282, na região de Campos Novos-SC.

4.2.1 Caracterização dos tipos de revestimentos

Os revestimentos foram caracterizados de acordo com a sua granulometria, diâmetro máximo do agregado, tipo de rocha e tipo de ligante. Os dados foram retirados dos projetos dos revestimentos disponibilizados pelas empresas executoras e pelos respectivos órgãos gestores.

4.2.1.1 Mistura asfáltica densa (Contorno de Araranguá BR-101)

Os agregados utilizados nessa mistura asfáltica densa são de origem basáltica. No Quadro 4.4 são apresentados alguns resultados dos ensaios realizados no agregado. A mistura foi aplicada em 2012, e a rodovia aberta ao tráfego em 2014. A rodovia possui um número $N_{8,2}$ de $1,7 \times 10^8$.

Quadro 4.4 - Resultados da caracterização dos agregados

Propriedades dos agregados	Resultados
Massa específica aparente do agregado graúdo	2,880 g/cm ³
Absorção do agregado graúdo	0,85%
(Abrasão Los Angeles)	11,6%
Sanidade	2,1%
Índice de forma (partículas planas e alongadas)	9,6%

Fonte: Melo (2014).

A granulometria da mistura asfáltica se encaixa na faixa B do DNIT com tamanho máximo do agregado de 19,0 mm. O ligante é o CAP 50/70 com teor ótimo de projeto de 4,35% e porcentagem de volume de vazios de 4,01%.

4.2.1.2 Mistura asfáltica densa (Avenida Beira-Mar UFSC)

A granulometria dessa mistura asfáltica densa se enquadra na faixa B do DNIT sendo o ligante o CAP 50/70. Os agregados utilizados são de

origem granítica. A dosagem da mistura asfáltica foi fornecida pelo Deinfra-SC e elaborada pela empresa Sinoda S/A., em 1980, com teor de ligante entre 4,78 e 5,04% e porcentagem de volume de vazios entre 3,0 e 3,5%. A granulometria da mistura do projeto da Avenida Beira-Mar é apresentada no Quadro 4.5. Portanto, a mistura empregada tem mais de 30 anos de exposição ao tráfego. A Avenida possui um número $N_{8,2}$ de 3×10^7 . A denominação Beira-Mar UFSC foi adotada para designar o segmento da rodovia entre o elevado do CIC (Centro Integrado de Cultura) e o final da Beira-Mar, junto à UFSC. Este segmento não sofreu até o momento qualquer intervenção que não seja tipo remendo.

Quadro 4.5 - Granulometria da mistura asfáltica densa (Avenida Beira-Mar UFSC)

Peneira	% Passante
1"	100
3/4"	98,1
3/8"	72,7
Nº 4	47,1
Nº 10	32,5
Nº 40	20,1
Nº 80	11,1
Nº 200	4,1

4.2.1.3 Mistura asfáltica densa com borracha (Avenida Beira-Mar)

A granulometria da mistura asfáltica com borracha utilizada na Avenida Beira-Mar em Florianópolis se encaixa na Faixa C do DNIT com teor de CAP de 5,6% e volume de vazios entre 3,7 e 5,0% de acordo com o projeto da mistura asfáltica fornecido pela empresa Sulcaterinense Engenharia S/A. A granulometria da mistura do projeto é apresentada no Quadro 4.6. Esta mistura foi utilizada na restauração de um trecho da Beira-Mar em 2012 (que vai desde o elevado Rita Maria até o elevado do CIC). O ligante utilizado foi o Ecoflex B, fornecido pela Greca Asfalto S.A.

Quadro 4.6 - Granulometria da mistura asfáltica com borracha

Peneiras (Nº)	% passante
3/4"	100
1/2"	86,8
3/8"	81,06
Nº 04	60,71
Nº 10	41,82
Nº 40	18,44
Nº 80	12,37
Nº 200	8,01

4.2.1.4 Microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101)

O projeto do microrrevestimento foi realizado pela Greca Asfaltos. A granulometria ficou encaixada na Faixa II do DNIT 035/2005-ES com 25% de pedrisco, 74,5% de pó de pedra e 0,5% de cal hidratada e teor ótimo da emulsão de 9,5%. O Quadro 4.7 apresenta a granulometria do microrrevestimento que possui tamanho máximo do agregado de 9,5 mm.

O microrrevestimento foi aplicado em 2015. A rodovia possui um volume de tráfego $N_{8,2}$ de $1,7 \times 10^8$.

Quadro 4.7 - Granulometria do microrrevestimento

Tamanho (mm)	Faixa II do DNIT (%)		Mistura
	Limite inf.	Limite sup.	
9,52	100,00	100,00	100,00
4,76	70,00	90,00	80,71
2,38	45,00	70,00	57,49
1,18	28,00	50,00	38,25
0,60	19,00	34,00	27,84
0,33	12,00	25,00	22,84
0,15	7,00	18,00	14,48
0,07	5,00	15,00	10,21

4.2.1.5 Camada porosa de atrito CPA (Trecho: Lages-Campos Novos, BR-282)

A mistura asfáltica tipo CPA foi aplicada no trecho da BR-282 que liga Campos Novos a Lages (SC). A granulometria da mistura se enquadra na faixa V de acordo com a especificação de serviço DNER-ES 386/99, com teor ótimo de CAP de 4,3%, com variação de 4,0 a 4,6%, e

porcentagem de volume de vazios de 21,9%. O ligante utilizado foi o CAP 50/70 com borracha. O Quadro 4.8 mostra a granulometria do projeto da mistura elaborado pela Greca Asfaltos, a que se tem tamanho máximo do agregado de 19,0 mm. A rodovia foi aberta ao tráfego em 2006. O tráfego $N_{8,2}$ da rodovia é de 1×10^7 .

Quadro 4.8 - Granulometria da camada porosa de atrito

Peneiras (Nº)	(%) passante
3/4"	100
1/2"	79,5
3/8"	62,9
Nº 04	28,3
Nº 10	15,1
Nº 40	6,9
Nº 200	4,5

4.2.1.6 Mistura asfáltica do tipo gap graded (Trecho: SC-446 a BR-101, Criciúma)

O projeto da mistura foi fornecido pela empresa SETEP Construções S.A. e realizado pelo Laboratório Central de Pavimentação da Petrobrás (LCPBR).

Os agregados dessa mistura asfáltica são de origem basáltica. A granulometria da mistura se encaixa na faixa GAP Graded do DNIT, conforme o Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Granulometria da mistura asfáltica do tipo gap graded

Peneiras #	Mistura (% passante)	Gap Graded	
		mín	máx
3/4"	100,0	100,0	100,0
1/2"	90,2	90,0	100,0
3/8"	85,6	78,0	92,0
4	39,1	28,0	42,0
10	18,3	14,0	24,0
40	10,1	8,0	17,0
80	7,7	5,0	11,0
200	5,7	2,0	7,0

Fonte: Laboratório Central de Pavimentação da Petrobrás (LCPBR).

O ligante utilizado para a dosagem foi o CAPFLEX B proveniente da empresa FASFPAR (Fábrica de Asfalto do Paraná) no município de

Ponta Grossa - PR. O teor de ligante definido na dosagem foi 6,3%, com porcentagem de volume de vazios da mistura de 5,1%.

A mistura foi aplicada em 2015, mas até o momento das medições (março 2016) a rodovia não havia sido aberta ao tráfego.

4.2.1.7 Mistura asfáltica densa (SC-403, Florianópolis)

O projeto da mistura asfáltica foi fornecida pelo DEINFRA-SC. A dosagem da mistura foi elaborada pela empresa Greca Asfaltos S. A.

O agregado é de origem granítica. O ligante asfáltico é o ECOFLEX B 3G, que tem como vantagem a possibilidade de aceitar uma temperatura menor de compactação em relação ao ECOFLEX B.

A mistura asfáltica está enquadrada na faixa “D” do Deinfra com teor ótimo de ligante de 5,5% e porcentagem de volume de vazios de 3,5%, e tamanho máximo do agregado de 19,0 mm. O Quadro 4.10 apresenta a granulometria da mistura asfáltica. A mistura foi aplicada na duplicação da SC-403 e aberta ao tráfego em Dezembro de 2015. O número N é de 1×10^7 .

Quadro 4.10 - Granulometria da mistura asfáltica densa da SC-403

Peneiras #	Mistura (% passante)	Faixa “D” Deinfra	
		mín	máx
3/4”	100,0	100,0	100,0
1/2”	94,4	90,0	100,0
3/8”	85,2	76,0	100,0
4	52,9	44,0	93,0
10	37,4	25,0	55,0
40	17,3	9,0	27,0
80	10,2	4,0	17,0
200	4,1	2,0	10,0

4.2.1.8 Mistura asfáltica densa (BR-101, Km 257 – sentido sul).

O projeto da mistura asfáltica densa desse trecho foi fornecido pelo DNIT-SC. O agregado é de origem granítica e a granulometria da mistura se encaixa na faixa “IV” do Instituto do Asfalto. A mistura possui um teor ótimo do CAP 50/70 de 4,9% e porcentagem de volume de vazios na faixa de 3 a 5%. O Quadro 4.11 apresenta a granulometria da mistura asfáltica que foi aplicada em 2014. A rodovia possui um número $N_{8,2}$ de $1,7 \times 10^8$.

Quadro 4.11 - Granulometria da mistura asfáltica densa da BR 101-Km 257.

Peneiras #	Mistura (% passante)	Faixa “IV” Petrobrás	
		mín	máx
3/4”	100,0	100,0	100,0
1/2”	90,4	80,0	100,0
3/8”	81,2	70,0	90,0
4	58,4	50,0	70,0
8	44,5	35,0	50,0
30	25,9	18,0	29,0
50	18,2	13,0	23,0
100	10,5	8,0	16,0
200	6,2	4,0	10,0

4.2.1.9 Pavimento rígido

Foram realizadas as medições do ruído pneu-pavimento em dois túneis:

a) Túnel Antonieta de Barros-Florianópolis.

Pavimento rígido aberto ao tráfego em 2002. O pavimento foi executado com régua vibratória manual e a textura com vassoura de piaçava no sentido transversal.

b) Túnel Morro Agudo.

O segmento avaliado localiza-se no município de Paulo Lopes no sentido sul da rodovia e foi aberto ao tráfego em 2011. O pavimento rígido foi executado com vibro acabadora. Inicialmente as duas faixas de rolamento e acostamento receberam texturização com vassoura de piaçava no sentido transversal. Posteriormente, a superfícies das duas faixas de rolamento foram micro fresadas (grinding) para corrigir a irregularidade, originando uma textura caracterizada por “canais” longitudinais.

4.2.2 Caracterização da textura em campo

A macrotextura dos revestimentos dos pavimentos estudados foram determinadas através do Método da Mancha de Areia utilizando as diretrizes da Norma ASTM E 965. As medições foram realizadas exatamente nas trilhas de atuação dos pneus do Trailer-CPX.

Foram realizados o mínimo de três ensaios para cada tipo de revestimento asfáltico e segmento de avaliação do ruído. Para cada

ensaio, foram anotadas quatro leituras do diâmetro da mancha de areia. A altura da macrotextura foi calculada de acordo com a equação 2.26. As Figuras de 4.47 a 4.57 ilustram a realização do ensaio e os Quadros de 4.12 a 4.22 apresentam os resultados das medições. O Quadro 4.23 mostra o resumo dos resultados das medições.

Figura 4.47 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento do Contorno de Araranguá BR-101 (Mistura convencional densa)



Figura 4.48 - Ensaio da mancha de areia no segmento do Contorno de Araranguá BR-101 (Revestimento com Microrrevestimento)



Para a mistura asfáltica CPA não foram realizados os ensaios. A caracterização da textura através do ensaio da mancha de areia quando se trata de um revestimento poroso ou drenante não é adequada, pois esses revestimentos apresentam uma textura negativa e a areia do ensaio penetra entre os vazios da mistura, gerando um resultado geralmente de textura muito grosseira.

Figura 4.49 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da Avenida Beira-Mar, Lado Direito, sentido UFSC (Mistura densa convencional e com 30 anos de abertura ao tráfego)



Figura 4.50 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da Avenida Beira-Mar, Lado Esquerdo-sentido centro



Figura 4.51 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da Avenida Beira-Mar (Mistura asfalto-borracha)



Figura 4.52 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da SC-446 a BR-101, Criciúma (revestimento com asfalto-borracha, mistura tipo gap graded)



Figura 4.53 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste da SC-403 em Florianópolis (revestimento com asfalto-borracha)



Figura 4.54 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste do Km 257, sentido sul da BR-101 (revestimento com ligante convencional)



Figura 4.55 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste do Túnel Antonieta de Barros, Florianópolis (pavimento rígido com cerca de 14 anos de abertura ao tráfego)



Figura 4.56 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste no Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC (pavimento rígido, com microfresagem nas duas faixas de rolamento)



Figura 4.57 - Ensaio da mancha de areia realizado no segmento teste do Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC (pavimento rígido, faixa do acostamento, com textura convencional, transversal)



Quadro 4.12 - Macrotextura da mistura densa convencional (Contorno de Araranguá BR-101) Com dois anos de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	240	225	241	237	236	0,57
2	245	247	235	240	242	0,54
3	242	235	241	239	239	0,56
Contorno de Araranguá BR-101 (mistura densa) $N_{8,2}=1,7 \times 10^8$					Altura média final	0,56
					Classificação	Média

Quadro 4.13 - Macrotextura do microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101), com um ano de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	140	141	130	135	137	1,71
2	145	130	130	130	134	1,78
3	143	139	134	128	136	1,72
Contorno de Araranguá BR-101 (Microrrevestimento) $N_{8,2}=1,7 \times 10^8$					Altura média final	1,74
					Classificação	Muito Grosseira

Quadro 4.14 - Macrotextura da mistura densa convencional (Avenida Beira-Mar, UFSC, sentido UFSC), com cerca de 30 anos de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	145	150	152	152	150	1,42
2	148	150	151	155	151	1,40
3	150	147	149	152	150	1,42
4	147	155	151	152	151	1,39
Avenida Beira-Mar (UFSC Lado Direito) $N_{8,2}=3 \times 10^6$					Altura média final	1,41
					Classificação	Muito Grosseira

Quadro 4.15 - Macrotextura da mistura densa convencional (Avenida Beira-Mar, estação de teste UFSC, sentido centro), com cerca de 30 anos de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	150	145	142	145	146	1,50
2	145	151	148	141	146	1,49
3	141	146	145	149	145	1,51
4	140	147	148	141	144	1,54
Avenida Beira-Mar (UFSC Lado Esquerdo-sentido sul) $N_{8,2}=3 \times 10^6$					Altura média final	1,51
					Classificação	Muito Grosseira

Quadro 4.16 - Macrotextura da mistura com asfalto-borracha (Avenida Beira-Mar), com quatro anos de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	245	240	232	237	239	0,56
2	247	235	238	242	241	0,55
3	237	247	241	235	240	0,55
4	240	241	236	234	238	0,56
Avenida Beira-Mar (Asfalto Borracha) $N_{8,2}=3 \times 10^7$					Altura média final	0,56
					Classificação	Média

Quadro 4.17 - Macrotextura da mistura densa com asfalto-borracha (SC 403 - Florianópolis), com um ano de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	220	225	215	230	223	0,64
2	230	235	215	220	225	0,63
3	231	235	216	220	226	0,63
SC 403 (Asfalto-Borracha) $N_{8,2}=1,0 \times 10^7$					Altura média final	0,63
					Classificação	Média

Quadro 4.18 - Macrotextura da mistura do tipo gap graded com asfalto-borracha (Trecho: SC-446 à BR-101, Criciúma). Sem tráfego até o momento (abril de 2016)

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	227	215	213	215	218	0,67
2	212	214	218	216	215	0,69
3	218	210	219	205	213	0,70
Criciúma (SC-446 a BR-101)					Altura média final	0,69
					Classificação	Média

Quadro 4.19 - Macrotextura da mistura densa convencional (BR-101, Km 257 sentido sul), com dois anos de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	198	181	215	206	200	0,80
2	197	180	210	199	197	0,82
3	204	199	203	192	200	0,80
4	188	178	198	191	189	0,89
5	173	186	189	182	183	0,96
BR-101 (Km 257-Sul) $N_{8,2}=1,7 \times 10^8$					Altura média final	0,85
					Classificação	Grosseira

Quadro 4.20 - Macrotextura do pavimento rígido (Túnel Antonieta de Barros), com 14 anos de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	276	284	274	270	276	0,42
2	269	275	270	278	273	0,43
3	265	267	275	277	271	0,43
Pavimento rígido (Túnel Antonieta de Barros) $N_{8,2}=1 \times 10^7$					Altura média final	0,43
					Classificação	Fina

Quadro 4.21 - Macrotextura do pavimento rígido da faixa microfresada (Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC), com 5 anos de atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	168	179	179	166	173	1,06
2	192	180	176	181	182	0,96
3	205	218	219	212	214	0,70
4	190	204	177	200	193	0,86
5	198	186	195	195	194	0,85
6	195	188	218	197	200	0,80
7	170	192	195	167	181	0,97
8	173	204	188	196	190	0,88
9	205	203	206	217	208	0,74
10	182	195	183	180	185	0,93
Faixa microfresada do Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC. $N_{8,2}=1,7 \times 10^8$					Altura média final	0,87
					Classificação	Grosseira

Quadro 4.22 - Macrotextura do pavimento rígido acostamento (Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC). Sem atuação do tráfego.

Macrotextura						
Medida	Diâmetros medidos (mm)				Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
1	310	312	300	285	302	0,35
2	305	300	284	280	292	0,37
3	265	267	272	278	271	0,44
4	296	280	311	298	296	0,36
5	286	316	305	298	301	0,35
6	315	282	277	286	290	0,38
7	291	300	292	270	288	0,38
8	281	291	300	299	293	0,37
9	305	299	291	291	297	0,36
10	318	310	330	298	314	0,32
Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC					Altura média final	0,37
					Classificação	Fina

Quadro 4.23 - Resumo da macrotextura dos revestimentos das rodovias avaliadas.

Macrotextura	Altura (mm)	Expectativa de Geração do Ruído (pneu-pavimento)	Tempo de atuação do tráfego
Mistura densa convencional (Contorno de Araranguá BR-101)	0,56	Pouca geração do ruído mecânico de impactos e choques	2 anos
Microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101)	1,74	Alta geração do ruído mecânico de impactos e choques	1 ano
Mistura densa convencional (Av. Beira-Mar, UFSC, sentido UFSC)	1,41	Alta geração do ruído mecânico de impactos e choques	Cerca de 30 anos
Mistura densa convencional (Av. Beira-Mar, UFSC, sentido centro)	1,51	Alta geração do ruído mecânico de impactos e choques	Cerca de 30 anos
Mistura com asfalto-borracha (Av. Beira-Mar)	0,56	Pouca geração do ruído mecânico de impactos e choques	4 anos
Mistura do tipo gap graded (Criciúma), asfalto-borracha	0,69	Média geração do ruído mecânico de impactos e choques	Sem atuação
Mistura asfáltica densa com asfalto-borracha (SC 403 - Florianópolis)	0,63	Média geração do ruído mecânico de impactos e choques	1 ano
Mistura densa convencional (BR-101, Km 257-Sul)	0,85	Média geração do ruído mecânico de impactos e choques	2 anos
Pavimento Rígido (Túnel Antonieta de Barros), textura com vassoura de piaçava	0,43	Pouca geração do ruído mecânico de impactos e choques	14 anos
Pavimento Rígido (Túnel do Morro Agudo) microfresado	0,87	Média geração do ruído mecânico de impactos e choques	5 anos
Pavimento Rígido (Túnel do Morro Agudo), textura com vassoura de piaçava	0,37	Pouca geração do ruído mecânico de impactos e choques	Sem atuação

Os resultados apresentados das macrotexturas das misturas asfálticas foram variados. As misturas foram classificadas desde média até muito grosseira. Por exemplo, a mistura asfáltica densa aplicada no Contorno de Araranguá teve altura da macrotextura de 0,56 mm, sendo classificada como média, e o microrrevestimento, com altura de 1,74 mm, aplicado no mesmo contorno, com classificação muito grosseira.

Os revestimentos da Av. Beira-Mar-UFSC mostraram um grande desgaste. Devido à ação do tráfego, a argamassa da mistura vai se desgastando e deixando os agregados mais expostos. Com isso, a macrotextura aumenta e a parcela do ruído gerado pelo mecanismos de impactos e choques pode aumentar consideravelmente.

É importante, para a diminuição dessa parcela do ruído, que o revestimento tenha uma macrotextura o mais lisa possível. Entretanto, quando a textura é muito lisa aparecem problemas como o aumento do “spray” em dias de chuvas e a diminuição da aderência pneu pavimento acarretando menor segurança aos usuários da via.

A macrotextura dos dois pavimentos rígidos com textura de vassoura de piaçava apresentaram classificação fina. Para as faixas em que o revestimento foi microfresado (túnel do Morro Agudo), a classificação foi média. Apesar de apresentar uma classificação fina para o túnel Antonieta de Barros, acredita-se que o revestimento não apresenta um risco ao usuário, já que se encontra dentro de um túnel em linha reta em que dificilmente se formaria uma película de água capaz de trazer problemas de aderência entre o pneu-pavimento.

4.2.3 Medição do Ruído Pneu-Pavimento

Para a medição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento nos diferentes revestimentos do pavimento foi utilizando o método do Trailer-CPX, de acordo com a norma ISO 11819-2 (ISO, 2010).

As medições foram realizadas nos segmentos testes na velocidade de referência de 80 km/h. Os segmentos testes de cada revestimento foram de pelo menos 200,0 metros em linha reta.

Para a determinação do CPXI os ensaios foram realizados para os dois pneus de referência (SRTT e AVON). Os pneus de referência são padronizados e foram importados da Europa. Todos os passos para a determinação do CPXI são apresentados com detalhes no item 2.4.1 desse trabalho. Nesse item é apresentado o resumo de todos os resultados obtidos. Todos os cálculos realizados para determinação do CPXI estão no Anexo 1.

4.2.3.1 Resultados para Mistura asfáltica densa (Contorno de Araranguá BR-101)

Os ensaios foram realizados no Contorno de Araranguá na pista do sentido sul-norte na faixa da direita (latitude -28.94442°; longitude -49.52782°). A Figura 4.58 ilustra o revestimento do pavimento dessa estação de teste.

Figura 4.58 - Mistura asfáltica densa (Contorno de Araranguá BR-101)



Para cada pneu de referência foram realizados dois ensaios exatamente nos segmentos em que a textura do revestimento foi caracterizada. Lembra-se que o resultado de cada ensaio é a média da aquisição de dados a cada 20 metros de medição, ou seja, o resultado de um ensaio para uma medição de 200 metros de cada segmento corresponde à média de 10 valores adquiridos pelos quatro microfones.

Para a determinação do nível de pressão sonora, primeiramente foram calibrados todos os quatro microfones de acordo com a Figura 4.59. A Figura 4.60 mostra a instalação dos microfones no Trailer-CPX. Os pneus de referência foram calibrados com 29 psi, como prescreve a norma ISO 11819-2 (ISO, 2010).

Figura 4.59 - Calibração dos microfones do Trailer-CPX



Figura 4.60 - Colocação dos microfones no Trailer-CPX



O Quadro 4.24 apresenta os valores do L_{cpX} (soma energética do nível de pressão sonora de todas as frequências) para cada microfone e pneu de referência dos ensaios realizados com o Trailer-CPX. A temperatura de ensaio foi de 22 °C para o pneu de referência SRTT e de 17 °C para o pneu Avon. Lembrando-se que a temperatura tem influência nos resultados das medições e para determinação dos índices acústicos os valores foram corrigidos para uma temperatura de referência de 20 °C.

Quadro 4.24 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura asfáltica densa do Contorno de Araranguá)

Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	97,9	98,2	98,7	98,3
2 (w=L)	97,3	97,5	99,1	98,6
3 (w=R)	97,5	97,0	97,8	97,9
4 (w=R)	96,7	97,2	98,2	98,5

*w=L corresponde ao pneu da esquerda e w=R o pneu da direita.

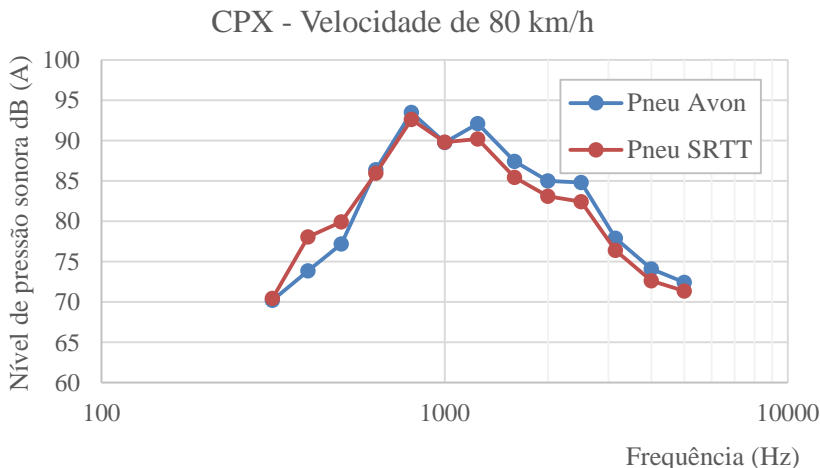
Realizando-se passo-a-passo os procedimentos de cálculo mostrado no item 2.4.1, determinaram-se os índices acústicos CPXP e CPXH para cada pneu de referência. O valor do índice acústico do revestimento CPXI é a média dos dois índices. O cálculo dos índices CPXP e CPXH encontra-se no Anexo I e o Quadro 4.25 mostra o resultado final do CPXI.

Quadro 4.25 - CPXI da mistura asfáltica densa do Contorno de Araranguá

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	97,08	98,28	97,68

A caracterização acústica do revestimento também pode ser apresentada em função da frequência para cada pneu de referência, como mostra a Figura 4.61.

Figura 4.61 - Resultados do ensaio de medição do ruído em função da frequência (mistura asfáltica densa do Contorno de Araranguá)



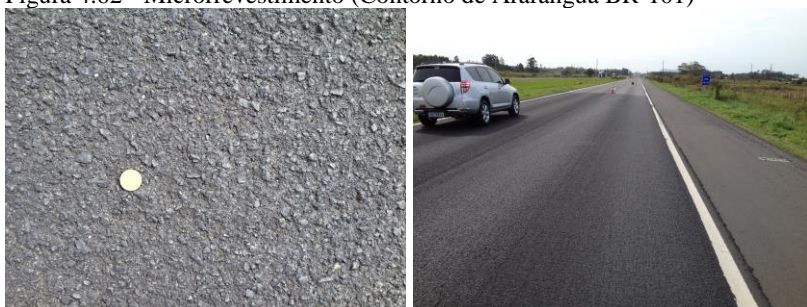
Os resultados apresentados no Quadro 4.24 mostraram pouca variação entre os microfones das duas medições para cada pneu de referência. Com isso, não foi necessária a realização de uma terceira medição como preconiza a norma empregada. O Quadro 4.25 mostra o resultado final dos índices calculados no Anexo 1. O nível de pressão sonora do pneu de referência Avon foi maior que o do pneu SRTT. Isso pode ser explicado pelas ranhuras do pneu Avon que simula os pneus dos veículos pesados, que geralmente apresentam maior nível de pressão sonora que os veículos leves.

A Figura 4.61 mostra o resultado final das medições em função da frequência. O pneu de referência Avon apresentou maior nível de pressão sonora em relação ao pneu SRTT para as frequências altas e menor para as baixas frequências. Os resultados serão melhor analisados em conjunto com os demais revestimentos asfálticos no item 4.2.4 desse capítulo.

4.2.3.2 Resultados do ensaio para o Microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101)

Os ensaios com o Trailer-CPX no microrrevestimento foram realizados na BR-101 no Contorno de Araranguá na pista do sentido sul-norte na faixa da direita (latitude -28.945608°; longitude -49.529096°). O segmento está localizado próximo a mistura asfáltica densa apresentada no item anterior desse capítulo. Os ensaios nos dois revestimentos foram realizados no mesmo dia. A Figura 4.62 mostra o microrrevestimento estudado.

Figura 4.62 - Microrrevestimento (Contorno de Araranguá BR-101)



Foram realizadas duas medições na velocidade de referência de 80 km/h, para cada pneu de referência. O Quadro 4.26 apresenta os resultados dos ensaios para cada microfone e pneu de referência.

Quadro 4.26 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Microrrevestimento do Contorno de Araranguá)

Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	100,6	100,8	100,3	100,7
2 (w=L)	101,3	101,4	101,1	101,3
3 (w=R)	100,1	100,3	100,7	100,9
4 (w=R)	100,4	100,7	101,3	101,3

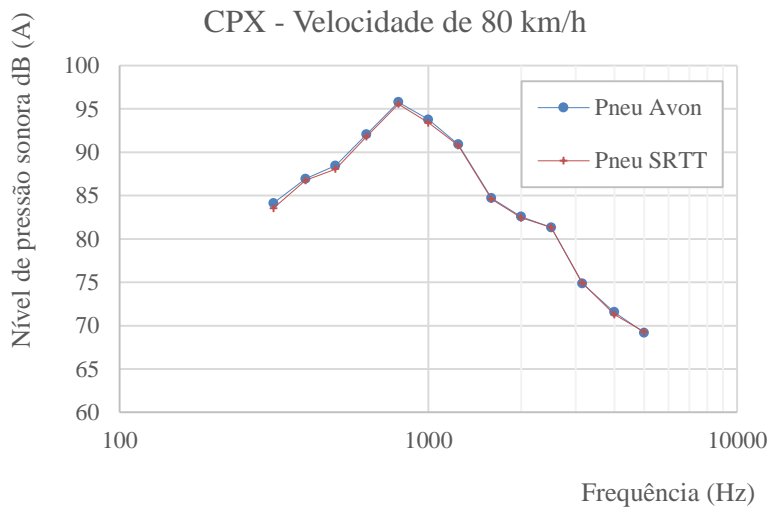
O passo-a-passo para o cálculo do CPXP e CPXH são apresentados no Anexo 1. Os valores dos índices acústicos do microrrevestimento são apresentados no Quadro 4.27.

Quadro 4.27 - CPXI do microrrevestimento do Contorno de Araranguá

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	101,15	101,57	101,40

Os resultados também são apresentados em função do espectro da frequência de ensaio (300 a 5.000 Hz), como mostra a Figura 4.63.

Figura 4.63 - Resultados do ensaio em função da frequência (microrrevestimento do Contorno de Araranguá)



O Quadro 4.26 apresenta os resultados do nível de pressão sonora para cada microfone de teste. Foram realizadas duas medições para cada pneu de referência. A diferença dos resultados entre as duas medições não foi significativa, e com isso, não foi necessário realizar outras medições.

O Quadro 4.27 e a Figura 4.63 mostraram que não houve diferença do nível de pressão sonora entre os pneus de referência. Para cada frequência o valor do nível de pressão sonora ficou muito próximo em ambos os pneus, ao passo que as curvas da Figura 4.63 praticamente se coincidem.

4.2.3.3 Resultados do ensaio para mistura asfáltica densa (Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC)

Foram realizados os ensaios de caracterização acústica da mistura asfáltica densa envelhecida (mais de 30 anos de idade) localizada na Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC em Florianópolis, na faixa central (latitude -27.596152 °; longitude -48.515484°). A Figura 4.64 mostra o local das medições.

Figura 4.64 - Mistura asfáltica densa (segmento Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC).



As temperaturas do ensaio foram de 22 °C para o pneu SRTT e de 20 °C para o pneu AVON. O Quadro 4.28 apresenta os resultados do nível de pressão sonora para cada microfone e pneu de referência. No Anexo I encontra-se o cálculo do CPXP e CPXH. O Quadro 4.29 mostra o resultado final do índice acústico (CPXI) do revestimento estudado.

Quadro 4.28 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC)

Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	101,3	101,1	100,1	100,2
2 (w=L)	100,0	99,7	99,8	100,3
3 (w=R)	*_	*_	100,2	100,7
4 (w=R)	100,1	100,6	99,9	100,2

*Microfone fora de posição (resultados invalidados)

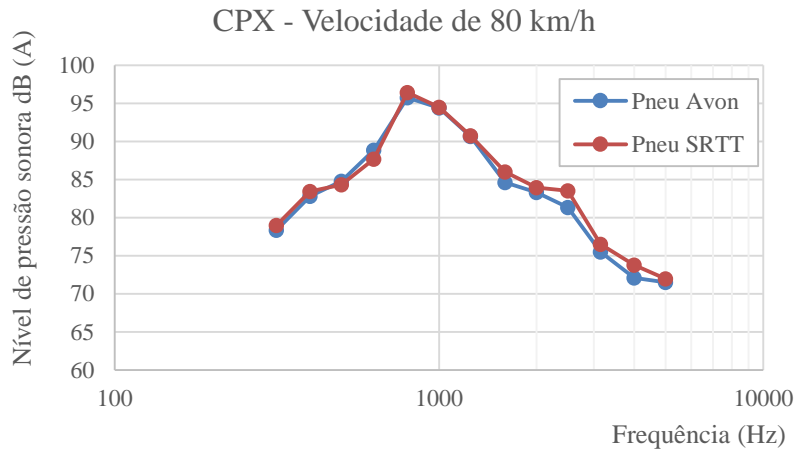
Os resultados dos microfones 3 do pneu de referência SRTT não foram analisados pois a haste que segurava o microfone saiu da posição especificada pela norma durante a medição. Isto só foi percebido ao final do ensaio.

Quadro 4.29 - CPXI da mistura asfáltica densa da Avenida Beira-Mar UFSC, sentido UFSC.

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	100,14	99,86	100,00

Os resultados também são apresentados em função da frequência para cada pneu de referência como mostra a Figura 4.65.

Figura 4.65 - Resultados do ensaio em função da frequência (Av. Beira-Mar UFSC, sentido UFSC)

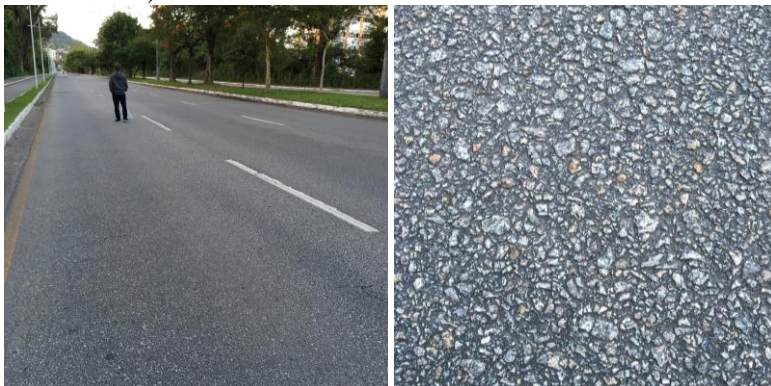


O revestimento asfáltico envelhecido da Avenida Beira-Mar apresentou praticamente o mesmo nível de pressão sonora para os dois pneus de referência. As curvas do NPS em função da frequência coincidem, com uma pequena diferença apenas nas frequências maiores, com maior destaque para a frequência de 2500 Hz.

4.2.3.4 Resultados do ensaio para a mistura asfáltica densa (Avenida Beira-Mar UFSC, sentido centro)

Muito próximo da estação de teste do item anterior também foi caracterizada acusticamente a mesma mistura asfáltica densa localizada na Avenida Beira-Mar UFSC, só que agora no sentido centro (latitude - 27.594070°; longitude -48.515141°). Os dois revestimentos asfálticos têm o mesmo projeto de mistura, e o ensaio de mancha de areia mostrou que o desgaste sofrido pelos dois revestimentos foi muito parecido. A Figura 4.66 mostra o local da medição. O Quadro 4.30 apresenta os resultados dos níveis de pressão sonora de dois ensaios para cada microfone e pneu de referência.

Figura 4.66 - Mistura asfáltica densa (segmento Avenida Beira-Mar UFSC, sentido centro).



Quadro 4.30 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Avenida Beira-Mar UFSC, sentido centro)

Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	100,7	100,3	100,9	100,7
2 (w=L)	100,1	100,5	100,4	100,6
3 (w=R)	*-	*-	101,0	100,9
4 (w=R)	100,5	100,7	100,5	100,8

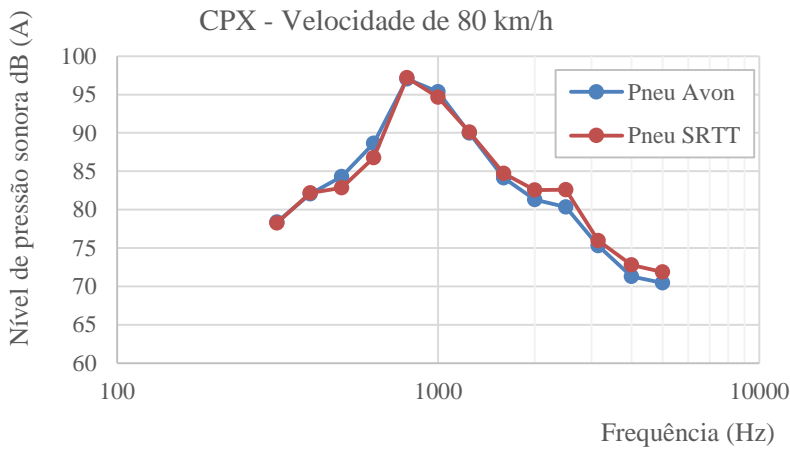
*Microfone fora de posição (resultados invalidados)

Os cálculos do CPXP e CPXH são apresentado no Anexo I e o Quadro 4.31 apresenta o resumo dos resultados. A Figura 4.67 apresenta o resultado do nível de pressão sonora em função da frequência.

Quadro 4.31 - CPXI da mistura asfáltica densa da Avenida Beira-Mar UFSC, sentido centro.

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	100,27	100,51	100,39

Figura 4.67 - Resultados do ensaio em função da frequência (Av. Beira-Mar UFSC, sentido centro)



As curvas do nível de pressão sonora em função da frequência para os dois pneus de referência foram parecidas. Nas baixas frequências o pneu AVON apresentou maior nível de pressão sonora. Porém, nas altas frequências, o pneu SRTT foi que obteve o nível de pressão sonora um pouco maior.

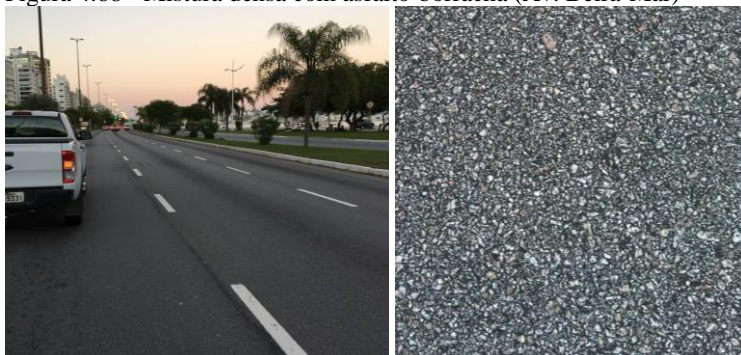
4.2.3.5 Resultados do ensaio para mistura densa com asfalto-borracha (Avenida Beira-Mar)

A Avenida Beira-Mar foi restaurada em 2012 sendo que as medidas foram feitas após 4 anos de atuação do tráfego. O segmento teste localiza-se na latitude -27.578465° e longitude -48.543833°.

Foram realizadas 3 medições para cada pneu de referência, pois a diferença entre as duas primeiras medições foram maiores que 0,5 dB (A) para os microfones 1 e 4. A Figura 4.68 mostra o local da medição do ruído. O Quadro 4.32 apresenta os resultados do nível de pressão sonora para cada ensaio e microfone. O cálculo dos índices CPXP e CPXH

encontram-se no Anexo I e o Quadro 4.33 mostra o resultado final do índice acústico do revestimento estudado (CPXI).

Figura 4.68 - Mistura densa com asfalto-borracha (Av. Beira-Mar)



Quadro 4.32 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura asfáltica com borracha - Av. Beira-Mar)

Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	98,5	98,6	99,6	99,1
2 (w=L)	98,6	98,3	97,3	97,8
3 (w=R)	*_	*_	98,1	98,5
4 (w=R)	97,5	97,2	98,0	98,1

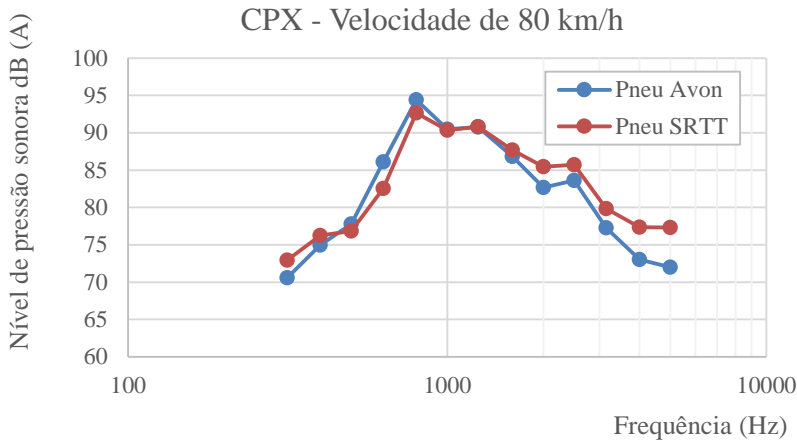
*Microfone fora de posição (resultados invalidados)

Quadro 4.33 - CPXI da mistura com asfalto-borracha - Av. Beira-Mar

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	97,64	98,03	97,83

Os resultados também podem ser apresentados em função da frequência para cada pneu de referência, como mostra a Figura 4.69.

Figura 4.69 - Resultados do ensaio em função da frequência (Mistura densa com asfalto-borracha - Av. Beira-Mar)



Na mistura com asfalto-borracha o pneu de referência AVON foi o que apresentou maior nível de pressão sonora. O gráfico da Figura 4.69 mostra que os valores do nível de pressão sonora entre os dois pneus estão próximos, mas não se coincidem em quase nenhuma frequência de referência.

4.2.3.6 Resultados do ensaio para mistura densa com asfalto-borracha (SC-403 Florianópolis)

A rodovia foi inaugurada em dezembro de 2015. Foram realizadas 3 medições para cada pneu de referência e nenhuma das medições a diferença foi maior que 0,5 dB (A). A Figura 4.70 mostra o local da realização do ensaio. As medições foram realizadas em Setembro de 2016 e as temperaturas do ensaio foram de 22 °C para o pneu SRTT e de 25 °C para o pneu Avon.

Figura 4.70 - Mistura densa com asfalto-borracha (SC-403 Florianópolis)



Foi medido o nível de pressão sonora dB (A) para cada microfone e pneu de referência no espectro da frequência de 315 a 5000 Hz. O Quadro 4.34 mostra os resultados do ensaio para microfone e pneu de referência. O cálculo do índice acústico CPXP e CPXH encontra-se no Anexo I e o Quadro 4.35 apresenta o resultado do CPXI. A Figura 4.71 mostra os resultados das medições em função das frequências de referência para os dois tipos de pneu (SRTT e Avon).

Quadro 4.34 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura densa com asfalto-borracha da SC-403 Florianópolis)

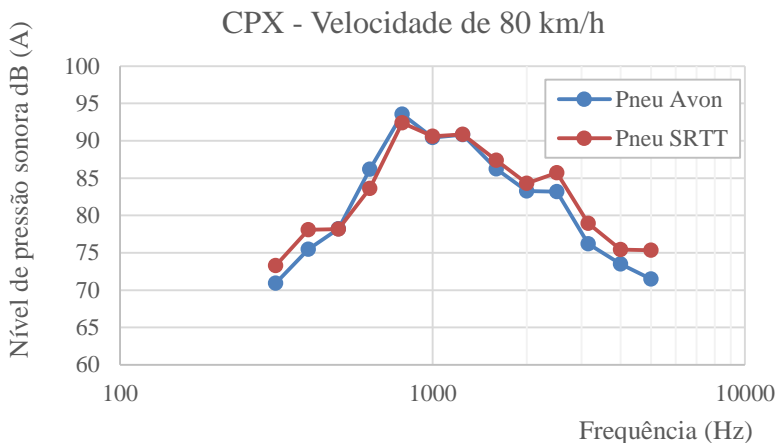
Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	98,6	98,8	98,9	99,3
2 (w=L)	98,1	98,6	96,9	97,1
3 (w=R)	*_	*_	97,8	97,5
4 (w=R)	97,2	97,1	97,9	98,3

*Microfone fora de posição (resultados invalidados)

Quadro 4.35 - CPXI da mistura densa com asfalto-borracha da SC-403 Florianópolis

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	97,54	98,15	97,85

Figura 4.71 - Resultados do ensaio em função da frequência (Mistura densa com asfalto-borracha da SC-403 Florianópolis)



A Figura 4.71 mostra que a curva do nível de pressão sonora em função da frequência para os dois pneus de referência têm uma tendência parecida, quase que coincidindo na frequência de 1000 Hz. Entretanto, o Quadro 4.35 mostra que o pneu de referência AVON apresenta maior valor do índice acústico CPXH em comparação com o pneu SRTT (CPXP). Com isso é esperado que os veículos pesados apresentem maior geração do ruído pneu-pavimento.

4.2.3.7 Resultados do ensaio na mistura do tipo gap graded com asfalto-borracha

O ensaio foi realizado em segmento localizado próximo ao município de Criciúma-SC, no trecho da SC-446 à BR-101. As medições foram executadas na faixa da direita e esquerda (latitude -28.77185°; longitude -49.32089°). O trecho foi recém construído e ainda não estava aberto ao tráfego (abril de 2016).

Como a rodovia não estava aberta ao tráfego, foi possível realizar várias medições com o Trailer-CPX. Entretanto, como praticamente todas as medições não apresentaram diferença significativa, foram escolhidas duas medições para cada pneu de referência para o cálculo dos índices acústicos do revestimento. A Figura 4.72 mostra a mistura asfáltica do tipo gab graded e o Quadro 4.36, os resultados das duas medições de cada pneu de referência. O cálculo dos índices acústicos CPXP e CPXH

encontram-se no Anexo I e o Quadro 4.37 apresenta o resumo destes índices e o valor do CPXI.

Figura 4.72 – Mistura Gab graded com borracha (Criciúma)



Quadro 4.36 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura tipo gab graded com asfalto-borracha)

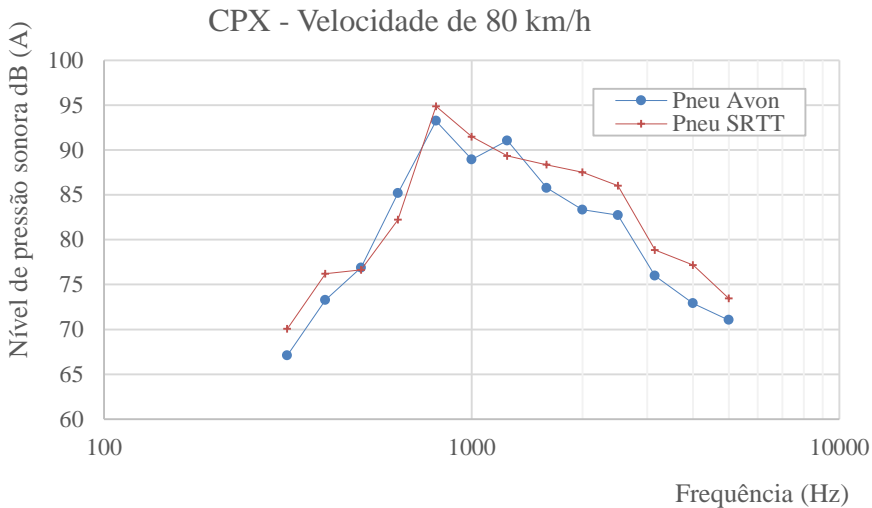
Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	98,4	98,3	98,2	97,9
2 (w=L)	97,6	98,0	97,6	97,4
3 (w=R)	99,8	100,2	97,7	97,2
4 (w=R)	98,9	99,2	97,3	96,9

Quadro 4.37 - CPXI da mistura asfáltica tipo gab graded com borracha

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	98,56	97,26	97,91

A Figura 4.73 ilustra os resultados do nível de pressão sonora em função da frequência para cada pneu de referência.

Figura 4.73 - Resultados do ensaio em função da frequência (mistura tipo gap graded com asfalto-borracha)



Os resultados apresentados no Quadro 4.37 e na Figura 4.73 mostram que o pneu de referência SRTT mostrou menor nível de pressão sonora em relação ao pneu Avon. A diferença foi mais perceptível para as frequências altas, acima de 800 Hz. Entretanto, a diferença do nível de pressão sonora total entre os dois pneus foi de apenas 1,3 dB(A).

4.2.3.8 Resultados do ensaio para a camada porosa de atrito-CPA (BR-282)

A camada porosa de atrito aplicada no revestimento da BR 282 – trecho Lages-Campos Novos seguiu a granulometria da especificação do DNER/1998. A rodovia foi aberta ao tráfego em 2006 e o segmento teste encontra-se entre o Km 269 e 270. A Figura 4.74 mostra o local do ensaio, e a Figura 4.75 ilustra a instalação dos microfones.

Ressalta-se que esta rodovia está aberta ao tráfego desde 2006 e atravessa uma grande região produtora de grãos com equipamentos agrícolas transitando na rodovia, contaminando a superfície com material argiloso.

Figura 4.74 - Camada porosa de atrito CPA (BR-282)



Apesar de não ser possível caracterizar a textura da camada porosa de atrito em campo, em uma análise visual se pode afirmar que a mesma apresenta uma textura negativa, que é a ideal para a redução da geração do ruído pneu-pavimento da parcela referente aos mecanismos mecânicos, principalmente de impactos e choques.

Figura 4.75 - Colocação dos microfones para as medições na CPA



Foram realizadas várias medições ao longo da rodovia (km 259, 260, 263, 264, 266, 267, 269, 270, 271, 272 e 273). Para o cálculo do CPXI foram escolhidas apenas duas medições, pois algumas delas não foi possível chegar com precisão na velocidade de 80 km/h e as demais, que estavam na velocidade de referência, não apresentaram grande variação entre as medições. O Quadro 4.38 mostra os resultados das duas medições de cada pneu de referência escolhidos, enquanto que o Quadro 4.39 apresenta o resultado final do CPXI. O cálculo dos índices acústicos CPXP e CPXH encontram-se no Anexo I.

Quadro 4.38 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Camada porosa de atrito).

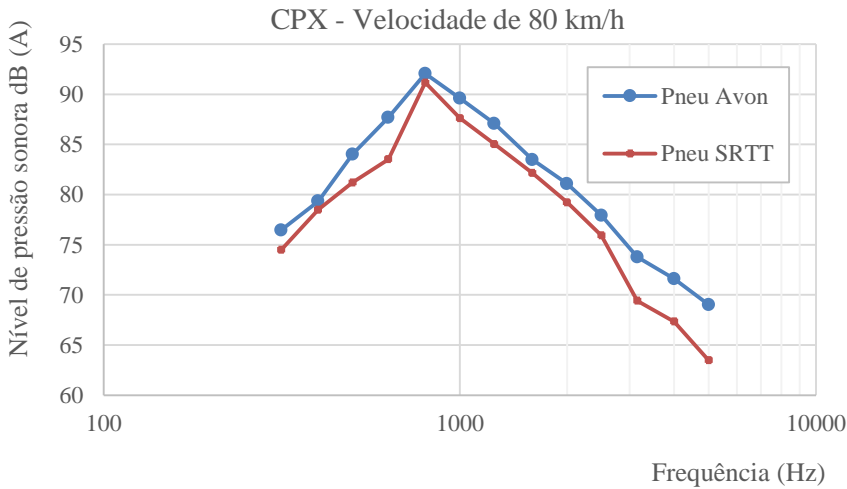
Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01 Km 265	Ensaio 02 Km 269	Ensaio 01 Km 265	Ensaio 02 Km 269
1 (w=L)	95,7	95,2	96,8	96,5
2 (w=L)	94,5	95,0	97,3	96,8
3 (w=R)	94,7	94,6	96,2	96,0
4 (w=R)	94,8	94,5	96,0	96,0

Quadro 4.39 - CPXI da camada porosa de atrito CPA.

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	94,74	96,47	95,61

Os resultados da caracterização acústica da CPA também são apresentadas em função da frequência na Figura 4.76, para os dois pneus de referência.

Figura 4.76 - Resultados do ensaio em função da frequência (camada porosa de atrito).



Os resultados apresentados na Figura 4.76 mostram que o nível de pressão sonora do pneu Avon foi maior para todas as frequências em relação ao pneu SRTT. Com isso, é possível afirmar que veículos pesados

irão produzir um ruído maior que os veículos leves na camada porosa de atrito, levando em consideração apenas o pneu.

4.2.3.9 Resultados do ensaio na mistura asfáltica densa convencional (BR-101, sentido Sul)

O segmento teste está localizada no Km 257 da BR-101, no sentido sul (latitude -27.993761°; longitude -48.687803°). A mistura asfáltica densa comum está aberta ao tráfego a 2 anos.

Foram realizadas 3 medidas para cada tipo de pneu e as duas de cada pneu que apresentaram menor diferença entre si foram utilizadas para o cálculo do CPXP e CPXH (vide Anexo I). O Quadro 4.40 mostra os resultados das duas medidas para cada pneu de referência e o Quadro 4.41, o índice acústico CPXI do revestimento estudado.

Os resultados também são apresentados em função da frequência, para cada pneu de referência, na Figura 4.77.

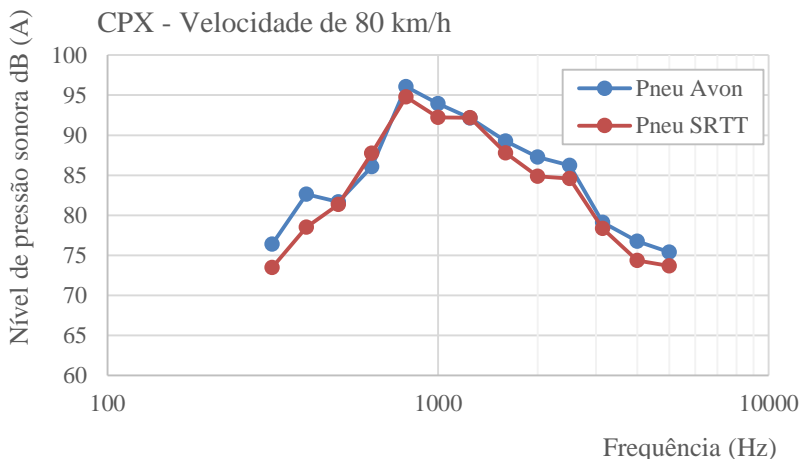
Quadro 4.40 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Mistura asfáltica densa convencional (BR-101, Km 257-Sentido Sul)).

Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	99,1	99,1	100,4	100,3
2 (w=L)	100,0	100,4	101,4	101,0
3 (w=R)	99,5	99,1	100,3	99,9
4 (w=R)	99,6	99,5	100,9	100,4

Quadro 4.41 - CPXI da mistura asfáltica densa convencional (BR-101, Km 257-Sentido Sul).

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	98,49	99,66	99,07

Figura 4.77 - Resultados do ensaio em função da frequência (Mistura asfáltica densa convencional, BR-101, Km 257-Sentido Sul).



Os resultados da Figura 4.77 mostram que o nível de pressão sonora do pneu de referência AVON foi maior em praticamente todo o espectro da frequência em comparação com o pneu SRTT. Da mesma forma o índice do pneu de referência AVON (CPXH) também foi superior ao do pneu SRTT, como é apresentado no Quadro 4.41. Isto significa que o ruído gerado pelos caminhões serão maiores.

4.2.3.10 Resultados do ensaio para o Pavimento Rígido (Túnel Antonieta de Barros)

O Túnel Antonieta de Barros localiza-se em Florianópolis (Figura 4.78) e tem um comprimento de 130 metros. Para cada pneu de referência foram realizadas diversas medições ao longo do túnel. Para os cálculos dos índices acústicos foram utilizadas duas medições em um segmento de 200 metros para cada pneu, já que o resultado da soma energética das frequências não foi superior a 0,5 dB (A) em relação a cada medição realizada. O Quadro 4.42 mostra o resultado das medições.

Figura 4.78 - Pavimento rígido no Túnel Antonieta de Barros.



Quadro 4.42 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Pavimento rígido do Túnel Antonieta de Barros).

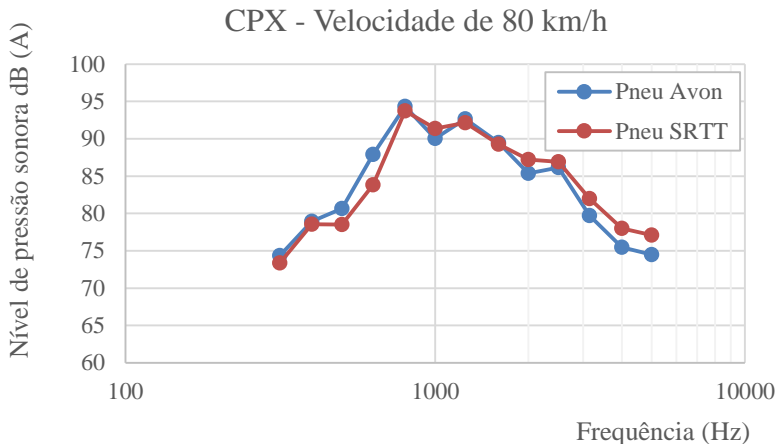
Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	99,8	100,3	100,2	100,1
2 (w=L)	98,9	99,3	99,3	98,8
3 (w=R)	98,7	98,9	99,2	99,5
4 (w=R)	98,6	99,0	99,0	98,9

O Quadro 4.43 apresenta o resultado final do índice acústico (CPXI) do revestimento estudado. Os cálculos realizados para a determinação CPXI é apresentado no Anexo I. Os resultados do nível de pressão sonora também são mostrados em função da frequência na Figura 4.79

Quadro 4.43 - CPXI do pavimento rígido do Túnel Antonieta de Barros.

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	98,95	98,97	98,96

Figura 4.79 - Resultados do ensaio em função da frequência (Pavimento rígido Túnel Antonieta de Barros).



O Quadro 4.43 mostra que o resultado do índice acústico dos dois pneus de referência foram praticamente idênticos. Alguma diferença entre os resultados dos pneus só pode ser observada quando se analisa o gráfico da Figura 4.79 que mostra que para as baixas frequências o pneu AVON tem resultados maiores que o pneu SRTT. Para as frequências maiores, é o pneu SRTT que apresenta níveis de pressão sonora maior.

4.2.3.11 Resultados do ensaio para o Pavimento Rígido na faixa microfresada (Túnel do Morro Agudo Paulo, Lopes-SC)

O Túnel do Morro Agudo, localiza-se no município de Paulo Lopes-SC. As medições foram realizadas ao longo da extensão total de 1.114 metros, apesar da norma ISO 11819-2 (ISO, 2010) prescrever um comprimento mínimo necessário de 100 metros. O ensaio foi efetuado sobre a faixa da esquerda que apresenta uma microfresagem longitudinal para correção da irregularidade, como mostra a Figura 4.80. O túnel foi aberto ao tráfego em 2011.

Figura 4.80 - Pavimento rígido do Morro do Agudo (faixa com microfresagem, paralela a atuação do tráfego).



Foram necessárias apenas duas passagens do Trailer-CPX para cada tipo de pneu de referência, uma vez que a diferença entre o nível de pressão sonora de cada microfone foi menor que 0,5 dB(A). As medições foram realizadas com tempo, na temperatura do ar de 25 °C para o pneu de referência SRTT e de 22 °C para o pneu do tipo Avon.

O Quadro 4.44 mostra os resultados das duas medições de cada pneu de referência e o Quadro 4.45 apresenta o resultado final do índice acústico CPXI. O cálculo do CPXP e CPXH encontra-se no Anexo I.

Quadro 4.44 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo, faixa microfresada).

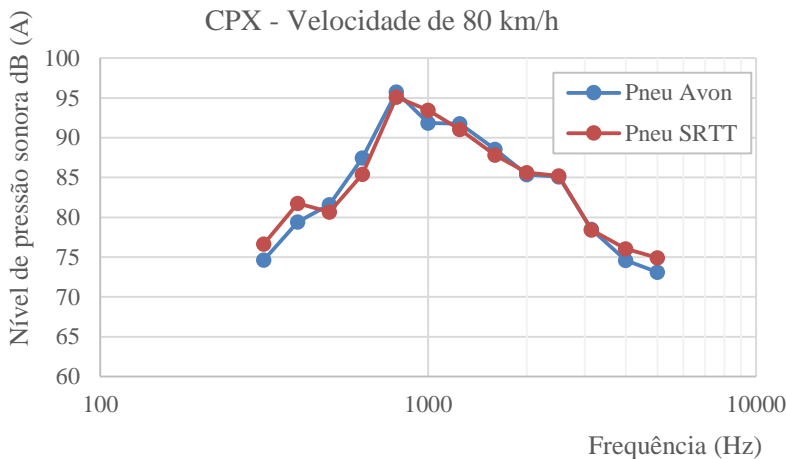
Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	98,6	98,7	99,3	99,3
2 (w=L)	99,7	100,1	100,1	100,2
3 (w=R)	99,5	99,9	99,9	99,7
4 (w=R)	100,1	100,6	100,3	99,8

Quadro 4.45 - CPXI do pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo, faixa microfresada.

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	98,65	98,91	98,78

Para cada tipo de pneu também são apresentados os resultados em função da frequência na Figura 4.81.

Figura 4.81 - Resultados do ensaio em função da frequência (Pavimento rígido do Morro Agudo da faixa com microfresagem).



Os resultados da Figura 4.81 mostram que praticamente os dois pneus de referência obtiveram o mesmo nível de pressão sonora em quase todas as frequências. No entanto, como a temperatura do ensaio do pneu AVON foi menor que do pneu SRTT, o resultado final do índice de pressão sonora do pneu AVON foi maior, como apresenta o Quadro 4.45. Lembra-se, todavia, que os resultados do nível de pressão sonora em função da frequência não estão levando em consideração a temperatura do ensaio.

4.2.3.12 Resultados do ensaio para o Pavimento Rígido na faixa do acostamento (Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes-SC)

Da mesma forma que o item anterior, foram realizadas medições do ruído pneu-pavimento no pavimento rígido do túnel do Morro Agudo porém agora na faixa correspondente ao acostamento (sem atuação do tráfego) para a qual não houve a microfresagem (Figura 4.82), mantendo-se a textura inicial com vassoura de piaçava executada transversalmente à atuação do tráfego.

Figura 4.82 - Pavimento rígido do Morro do Agudo (faixa do acostamento com textura de vassoura de piaçava).



O Quadro 4.46 apresenta os resultados para cada microfone e pneu de referência e o Quadro 4.47 mostra o resultado final do índice CPXI. O cálculo do CPXP e CPXH encontram-se no Anexo I.

Quadro 4.46 - Resultados da medição do ruído pneu-pavimento (Pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo, textura com vassoura de piaçava).

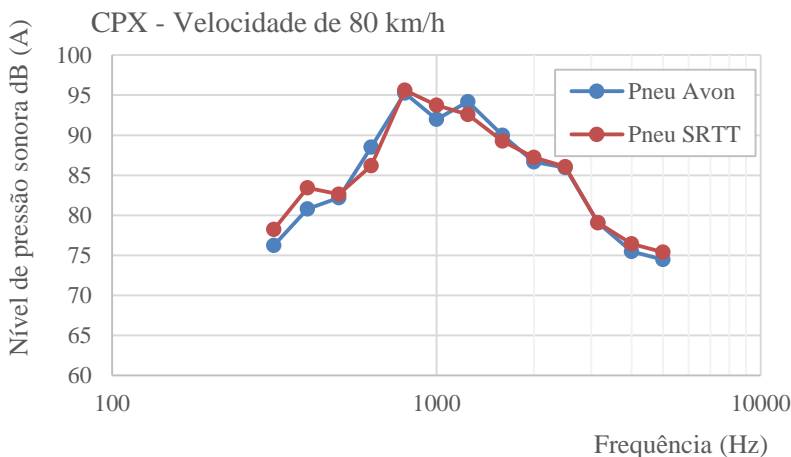
Microfones	Pneu SRTT dB(A)		Pneu Avon dB(A)	
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 01	Ensaio 02
1 (w=L)	99,5	100,0	100,2	99,8
2 (w=L)	100,4	100,9	101,3	101,0
3 (w=R)	100,4	100,6	100,6	100,2
4 (w=R)	100,8	101,3	100,7	100,2

Quadro 4.47 - CPXI do pavimento rígido do Túnel do Morro Agudo (textura com vassoura de piaçava).

NPS (80 km/h; w=L,R; n=1,2) dB(A)	CPXP (SRTT)	CPXH (Avon)	CPXI
	99,47	99,55	99,51

A Figura 4.83 apresenta os resultados em função do espectro da frequência.

Figura 4.83 - Resultados do ensaio do Trailer-CPX em função da frequência (Pavimento rígido do Morro Agudo).



A Figura 4.83 mostra que os dois pneus de referência obtiveram resultados parecidos do nível de pressão sonora em função da frequência. O mesmo aconteceu para os resultados do índice de ruído para cada pneu (CPXP e CPXH) como é apresentado no Quadro 4.47.

4.2.4 Análise dos Resultados do Ruído Pneu-Pavimento

4.2.4.1 Misturas asfálticas

Neste item foi realizada uma comparação dos resultados do nível de pressão sonora dos revestimentos estudados no item 4.2.3. A comparação foi dividida em duas partes: misturas asfálticas e pavimentos rígidos. A Figura 4.84 apresenta o nível de pressão de cada revestimento asfáltico em função da frequência para o pneu de referência SRTT e a Figura 4.85 para o pneu AVON. O Quadro 4.48 apresenta o valor final do índice de ruído de cada revestimento calculado (CPXI).

Figura 4.84 - Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu AVON.

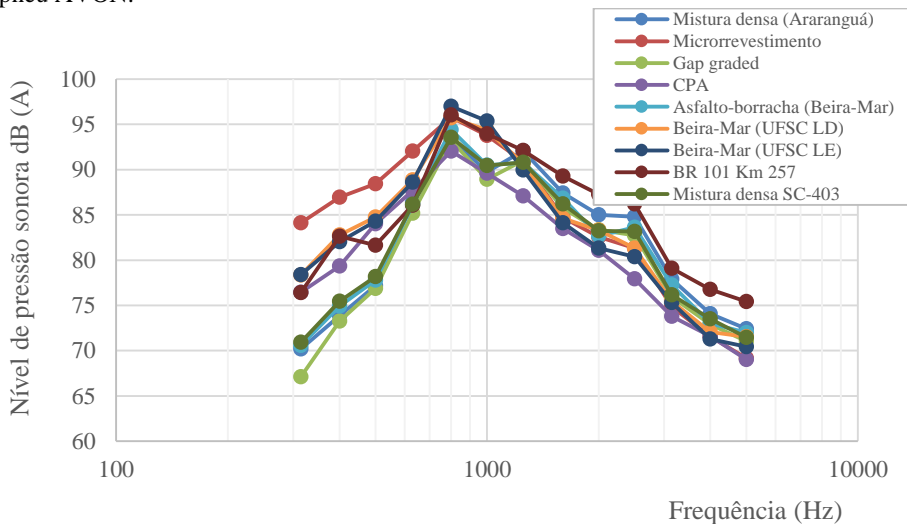
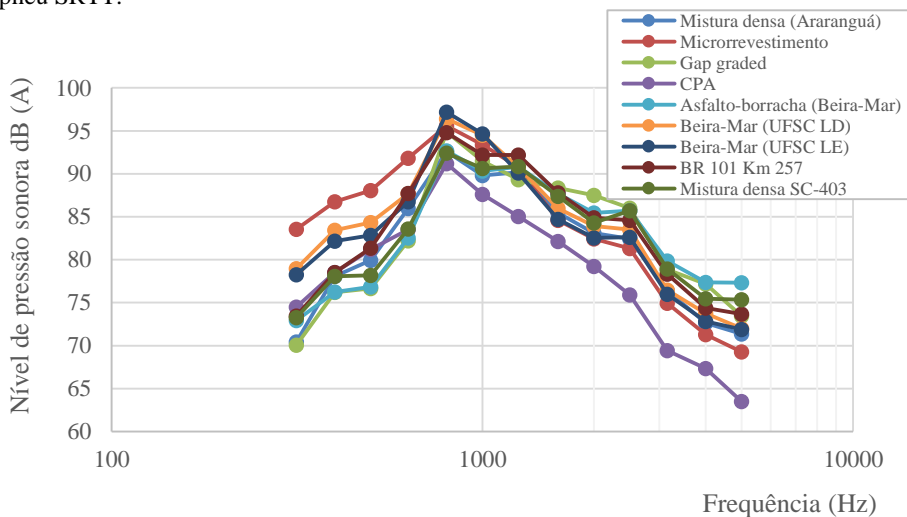


Figura 4.85 - Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu SRTT.



Quadro 4.48 - CPXI das misturas asfálticas dos revestimentos avaliados.

Revestimento	Tráfego $N_{8,2t}$	Idade	Mancha de areia (mm)	CPXI (dB(A))
Microrrevestimento	$1,7 \times 10^8$	1 ano	1,74	101,40
Beira-Mar UFSC Sentido Centro	3×10^6	Cerca de 30 anos	1,51	100,39
Beira-Mar UFSC Sentido UFSC	3×10^6	Cerca de 30 anos	1,41	100,00
BR-101 Km 257	$1,7 \times 10^8$	2 anos	0,85	99,07
Gap Graded com asfalto-borracha - Criciúma	Sem atuação	Sem atuação	0,69	97,91
SC-403 Florianópolis com asfalto-borracha	$1,7 \times 10^7$	1 ano	0,63	97,85
Beira-Mar, Asfalto- Borracha	3×10^7	4 anos	0,56	97,83
BR-101 Contorno de Araranguá	$1,7 \times 10^8$	2 anos	0,56	97,68
CPA com asfalto- borracha (Campos Novos – Lages)	1×10^7	10 anos	-	95,61

Os resultados mostram que o pico do nível de pressão sonora ficou entre 800 e 1000 Hz para todas as misturas asfálticas estudadas.

O Trailer-CPX apresentou resultados coerentes, na ordem de grandeza de acordo com a literatura internacional, como apresentado na Figura 2.31. Isso comprova que a construção e a certificação do Trailer foi realizada de acordo com todos os procedimentos exigidos pela norma ISO 11819-2 (2010).

A mistura do tipo CPA foi a que apresentou melhor capacidade de redução do ruído, mesmo após 10 anos de abertura ao tráfego. Isso pode ser explicado pela sua textura negativa, onde a textura do revestimento se comporta como lisa, reduzindo os efeitos dos mecanismos de geração mecânica do ruído. Também, pela sua porosidade, o ar consegue penetrar pelo revestimento e reduzir o efeito aerodinâmico do ruído, principalmente a parcela devido ao bombeamento do ar.

O microrrevestimento foi o que apresentou maior nível de pressão sonora. Isso é explicado pela alta rugosidade da sua textura positiva, comprovada no ensaio de mancha de areia. Com uma textura considerada

positiva os mecanismos de geração mecânica do ruído são os principais que aumentam o índice acústico final do revestimento estudado.

As misturas asfálticas que possuem a textura e porcentagem de volume de vazios parecidos apresentaram, não só os resultados do CPXI semelhantes, mas também, suas curvas do nível e pressão sonora em função da frequência foram muito parecidas. Estas misturas são a: Gap graded, a mistura densa SC-403, asfalto-borracha e mistura densa do Contorno de Araranguá.

Observa-se, também, que o microrrevestimento, a mistura densa UFSC LD e LE possuem os maiores níveis de pressão sonora nas frequências abaixo de 800 Hz. Isso pode ser explicado pela alta rugosidade das suas texturas que provoca o ruído de geração mecânica e esse, está associado as médias e baixas frequências. Por isso, seus níveis de ruído são maiores nessa faixa de frequência.

O estudo também mostra que a mistura asfáltica do tipo CPA obteve os menores valores do nível de pressão sonora nas frequências maiores, acima de 800 Hz. Isso foi possível pela sua alta porosidade, ao passo que diminui a geração do ruído da parcela aerodinâmica de bombeamento de ar, a qual está diretamente relacionada com as frequências acima de 1000 Hz.

Para as frequências abaixo de 800 Hz o nível de pressão sonora da mistura do tipo CPA se comportou como um revestimento de textura lisa, comprovando assim sua textura considerada negativa, ao passo que consegue diminuir o ruído de geração mecânica e ainda possui vazios que permitem que o ar penetre pelo revestimento e diminua a geração do ruído aerodinâmico.

Knabben (2012), também realizou ensaios de medição do ruído pneu-pavimento na Avenida Beira-Mar e na CPA. Entretanto, o método utilizado foi o CPB (Controlled Pass-Bay), executado com um veículo de teste. Da mesma forma, a mistura do tipo CPA apresentou os menores valores de ruído. O Quadro 4.49 apresenta o comparativo entre os resultados do Método CPX e o CPB para os mesmo tipos de misturas asfálticas.

Quadro 4.49 - Resultados do CPX e CPB dos revestimentos estudados para velocidade de 80 km/h.

Revestimento	Método CPB dB(A)	Método CPX dB(A)
Beira-Mar UFSC, sentido centro	85,31	100,0
Beira-Mar, Asfalto-Borracha	82,06	97,83
CPA com asfalto-borracha (Campos Novos – Lages)	79,8	95,61

O método CPX apresenta valores maiores do nível de pressão sonora em relação ao método CPB. No Trailer (CPX) os microfones ficam próximos ao pneu de referência e na medição pelo método CPB o microfone é instalado às margens da rodovia à uma distância de 1,0 metro do bordo da pista. Observa-se um aumento do nível de pressão sonora em torno de 15 dB(A) pelo método CPX.

4.2.4.2 Pavimento rígido

As Figura 4.86 e 4.87 apresentam os resultados dos níveis de pressão sonora em função da frequência dos revestimentos estudados. O Quadro 4.50 mostra o resultado final dos índices de ruído para cada revestimento.

Figura 4.86 - Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu AVON (pavimento rígido).

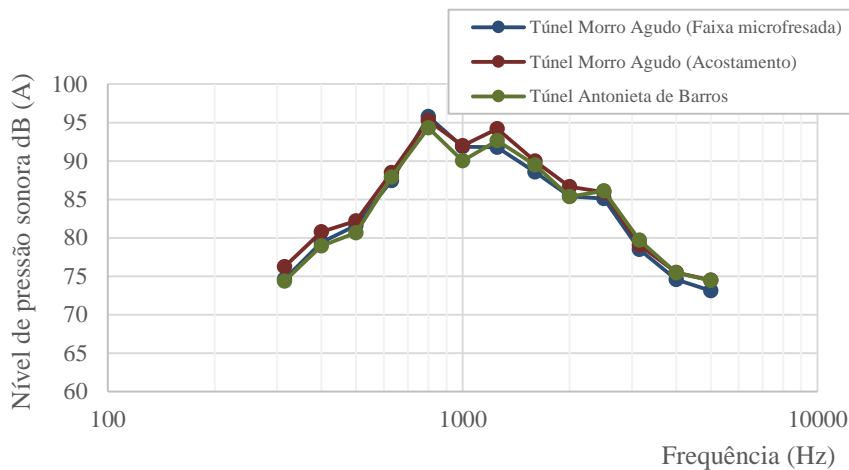
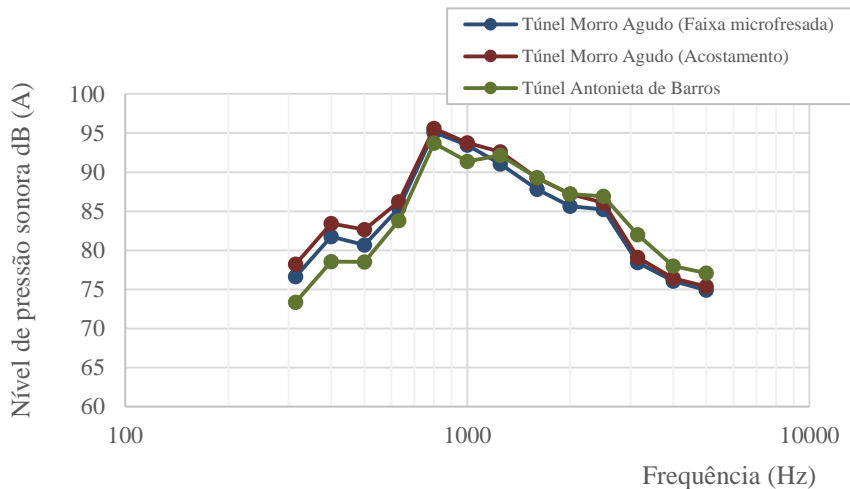


Figura 4.87 - Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu SRTT (pavimento rígido).



Quadro 4.50 - CPXI para o pavimento rígido com velocidade de 80 km/h.

Pavimento rígido	Mancha de areia (mm)	CPXI (dB(A))
Túnel Morro do Agudo (Acostamento), textura vassoura de piaçava	0,37	99,51
Túnel Antonieta de Barros (textura vassoura de piaçava)	0,43	98,96
Túnel Morro do Agudo (Faixa com microfresagem)	0,87	98,78

Os resultados mostram que as curvas do nível de pressão sonora em função da frequência foram semelhantes para os três revestimento. Também não existe diferença significativa no resultado final do índice de ruído CPXI.

Apesar da faixa microfresada apresentar a altura da mancha de areia maior que os outros dois revestimentos, isso não acarretou em um aumento do ruído de geração mecânica de impactos e choques. Como a microfresagem é homogênea e foi realizada no sentido longitudinal da faixa, é possível concluir que a passagem do pneu sobre o revestimento não causa nenhum tipo a mais de vibração (geração de ruído mecânico) em relação a um revestimento sem a microfresagem.

Com o objetivo de verificar a influência da rigidez na geração do ruído pneu-pavimento, o Quadro 4.51 mostra o comparativo dos revestimentos que apresentam texturas semelhantes.

Quadro 4.51 - CPXI para o pavimento rígido e flexível.

Pavimento		Mancha de areia (mm)	CPXI (dB(A))
Rígido	Túnel Morro do Agudo (Acostamento), textura vassoura de piaçava	0,37	99,51
	Túnel Antonieta de Barros (textura vassoura de piaçava)	0,43	98,96
Flexível	SC-403 Florianópolis com asfalto-borracha	0,63	97,85
	Beira-Mar, Asfalto-Borracha	0,56	97,83
	BR-101 Contorno de Araranguá	0,56	97,68

Os resultados do Quadro 4.51 mostram que os dois pavimentos rígidos apresentam nível de pressão sonora maiores que os pavimentos flexíveis (dois com asfalto-borracha e um com ligante convencional), mesmo com uma textura mais lisa, na qual reduz o ruído de geração mecânica.

A alta rigidez da superfície do pavimento rígido pode ser associada ao aumento da geração de ruído. A redução da rigidez da rodovia tenderá a reduzir as forças de impacto transmitidas em um pneu reduzindo assim os níveis de vibração dos mesmos.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO REVESTIMENTO DE BAIXO RUÍDO

4.3.1 Capacidade de Absorção Sonora da Mistura CPA – BR 282

Como mostrado nos itens anteriores, a mistura tipo CPA apresentou cerca de 5 dB(A) a menos na geração do ruído pneu-pavimento. Com o objetivo de caracterizar a capacidade de absorção sonora desta mistura, foram extraídos 13 corpos de prova do segmento teste onde se mediu o ruído com o Trailer-CPX. A Figura 4.88 mostra a extração e o aspecto dos corpos de prova.

Figura 4.88 - Extração de corpos de prova do trecho com a CPA.



O Quadro 4.52 apresenta a caracterização dos CPs em termos da espessura, porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes.

Quadro 4.52 - Volume de vazios e vazios comunicantes da CPA.

Estaca	Espessura (cm)	Volume de vazios (%)	Vazios comunicantes (%)
Km 269+000	3,9	10,57	9,98
Km 269+080	5,8	12,93	11,24
Km 269+160	4,0	7,36	6,98
Km 269+240	4,2	12,69	10,57
Km 269+320	5,0	9,27	7,55
Km 269+400	5,0	9,46	8,76
Km 269+480	5,2	11,22	10,34
Km 269+560	4,7	9,96	8,29
Km 269+640	5,3	11,30	10,00
Km 269+700 (TRE)	4,3	10,53	4,83
Km 269+700	4,3	12,18	11,28
Km 269+740 (TRE)	4,2	13,73	12,30
Km 269+740	4,9	15,65	12,50

A mistura asfáltica do tipo CPA foi projetada para ter um volume de vazios de 21,9 %. Os resultados apresentados no Quadro 4.52 mostram que o volume de vazios está, aproximadamente, a metade do valor projetado.

Desde a abertura ao tráfego não foi realizado nenhum tipo de limpeza dos poros do revestimento, os quais colmata naturalmente com o passar dos anos notadamente em região agrícola como a que está inserido o trecho da Rodovia, que não se tem controle de acesso. A Figura 4.92 mostra a impregnação da superfície com resto de solo argiloso deixado pela passagem de máquinas agrícolas e veículos que saem das áreas de cultivo e fazenda.

Figura 4.89 - Colmatção da mistura asfáltica CPA.

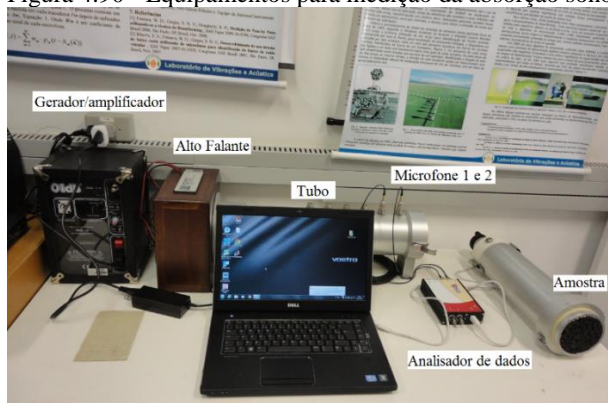


O ensaio de absorção acústica foi realizado utilizando o tubo de impedância de acordo com o procedimento especificado na ISO 10534-2:1998 E. Foi definida primeiramente a frequência de corte do ensaio de acordo com a equação 2.17. Para o diâmetro do tubo de 10 cm a frequência de corte é de 2009 Hz.

O coeficiente de absorção sonora foi determinado utilizando-se o método dos dois microfones, com distância entre os microfones de 50 mm e de 50 mm entre o microfone mais próximo do corpo de prova. Com isso, foi possível calcular a frequência de trabalho de acordo com a equação 2.18. O resultado mostrou uma faixa de trabalho calculada de 343 a 2744 Hz.

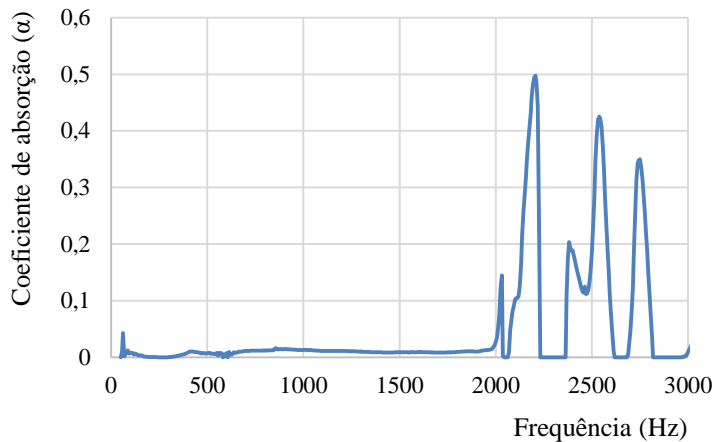
Portanto, os resultados do ensaio de absorção sonora foram avaliados no intervalo de frequência de 343 a 2009 Hz. A Figura 4.90 mostra os equipamentos utilizados para a realização do ensaio de absorção sonora.

Figura 4.90 - Equipamentos para medição da absorção sonora.



Na sequência, todo o sistema de medição foi calibrado e feito o ensaio de absorção sem a colocação do corpo de prova. A Figura 4.91 mostra o gráfico de absorção sonora sem a amostra, isto é, com o fundo rígido do tubo.

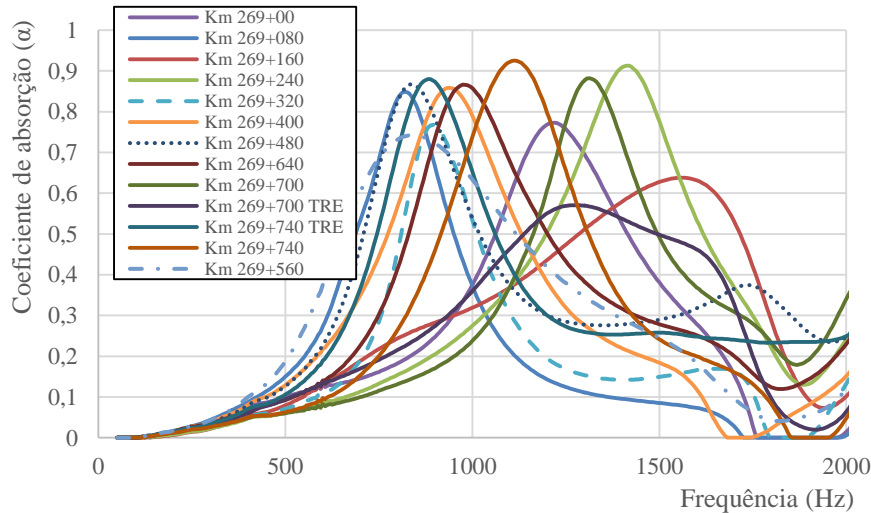
Figura 4.91 - Ensaio de absorção sem amostra.



O resultado da Figura 4.90 mostra que na região da frequência de 343 a 2009 Hz, onde deve ser avaliada a capacidade de absorção sonora, o tubo está em perfeitas condições de uso.

Para cada corpo de prova ensaiado foi construído um gráfico de absorção *versus* frequência. A Figura 4.92 apresenta todos os resultados do ensaio de absorção dos corpos de prova extraídos do campo.

Figura 4.92 - Curvas de absorção sonora da camada porosa de atrito do segmento teste na BR – 282.



Apesar da redução significativa do volume de vazios do revestimento, os resultados do ensaio de absorção mostram que o revestimento ainda apresenta uma boa capacidade de reduzir os mecanismos aerodinâmicos da geração de ruído pneu-pavimento com a maioria dos corpos de prova ensaiados ficando com o pico de absorção entre 800 e 1.100 Hz.

Esse excelente resultado após 10 anos pode ser explicado pela alta porcentagem de vazios comunicantes, ou seja, porcentagem de volume de vazios que ainda existem no revestimento quase que toda ela é de vazios comunicante. A Figura 4.93 mostra que o revestimento ainda consegue eliminar a película de água em dias de chuva, comprovando a eficiência dos vazios comunicantes mesmo após 10 anos de atuação do tráfego em região agrícola. E esta, ainda, eficiente ação dos vazios comunicantes que possibilita a redução do ruído pneu-pavimento.

As misturas asfálticas que possuem porcentagem de volume de vazios comunicantes ao redor entre 10 e 12% e camadas de 3,5 a 4,0 cm possuem uma elevada capacidade de reduzir o ruído pneu-pavimento.

Figura 4.93 - Mistura asfáltica CPA. Detalhe da água infiltrada na camada porosa e escoando para o acostamento.



4.3.2 Caracterização dos Materiais Para o Desenvolvimento do Revestimento de Baixo Ruído

4.3.2.1 Agregados

Os agregados minerais miúdo e graúdo utilizados são de origem granítica. O Quadro 4.53 apresenta os resultados de caracterização tecnológica.

Quadro 4.53 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.

Ensaio	Norma	Resultado
Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98 (1998)	21,4 %
Sanidade	DNER-ME 089/94	2,8 %
Absorção	DNER-ME 081/98	0,32 %
Adesividade	DNER-ME 078/94	0,3 % de dope
Índice de forma	ABNT – NBR 6954	82 % cúbica

4.3.2.2 Ligante Asfáltico

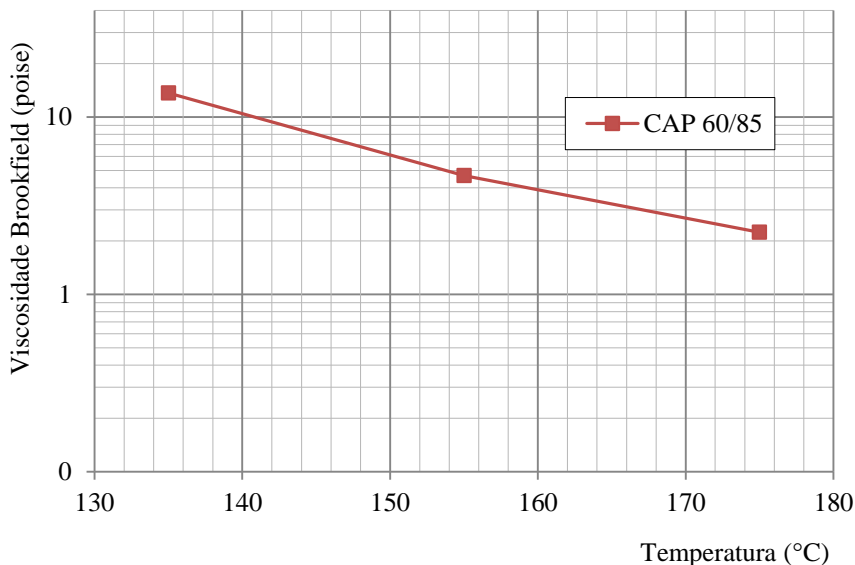
O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 60/85 (modificado com SBS). Foram realizados ensaios de penetração (DNIT 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT 131/2010), viscosidade Brookfield (ABNT NBR 15184) e recuperação elástica (ASTM D 6084).

O Quadro 4.54 mostra a média dos resultados dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica (6 pontos)

Quadro 4.54 - Resultados do ensaio de caracterização do ligante.

CAP	Ponto de Amolecimento (°C)	Penetração (0,1 mm)	Recuperação elástica (%)
FLEXPAVE 60/85	82,5	47,6	Entre 86-93

O ensaio de viscosidade do ligante asfáltico modificado foi realizado utilizando o viscosímetro rotacional Brookfield, com *spindle* 21, nas temperaturas de 135 °C (20 rpm), 150 °C (50 rpm) e 175 °C. A Figura 4.94 apresenta a curva viscosidade *versus* temperatura do ligante modificado (média de oito ensaios).

Figura 4.94 - Viscosidade *versus* temperatura.

Com a curva apresentada na Figura 4.94 não é possível determinar a temperatura de usinagem (0,17 Pa.s) e compactação (0,28 Pa.s) da mistura nas faixas determinadas pela especificações.

A viscosidade do ligante era alta e utilizando-se a curva para determinar as temperaturas de mistura e compactação ultrapassar-se-ia a temperatura de 180°C. Com isso, para a mistura e compactação foram utilizadas as temperaturas recomendados pelo fornecedor do ligante (Greca Asfaltos S.A) como mostra o Quadro 4.55.

Quadro 4.55 - Temperaturas de usinagem e compactação da mistura recomendado pelo fornecedor do ligante (Greca Asfaltos S.A).

Temperaturas °C	FLEXPAVE 60/85
Ligante asfáltico	160 - 165
Agregado	170 - 175
Compactação (temp. mínima)	145

Fonte: Greca Asfaltos S.A.

4.3.3 Projeto da mistura

4.3.3.1 Definição das granulometrias das misturas

Foram definidas duas granulometrias de acordo com a literatura internacional, como apresenta a Figura 3.5 no Capítulo 3. Ainda buscou-se uma porcentagem de volume de vazios entre 15 e 18% e porcentagem de vazios comunicantes de 10 a 12%.

Essas misturas teriam uma maior vida de serviço em relação às misturas asfálticas porosas com maiores porcentagens de vazios (entre 25 e 30%), e já seria suficiente para uma redução significativa do ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos. (LI *et al.*, 2014).

Com o objetivo de diminuir o ruído gerado pela textura do revestimento, buscou-se uma mistura asfáltica com o menor tamanho máximo do agregado possível. Foram escolhidos os tamanhos máximos do agregado de 4,8 e 6,3 mm.

Misturas asfálticas com tamanho máximo do agregado menor reduzem o ruído gerado pelo mecanismo de impacto e choques (FEHRL, 2006).

4.3.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Foram confeccionados corpos de provas para duas granulometrias diferentes. Os corpos de prova foram compactados na PCG com 50 giros, pressão vertical de 600 kPa, ângulo de giro de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ e velocidade de giro de 30 rpm para um corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 63 mm de altura, aproximadamente.

Para cada mistura foram avaliados 5 teores de ligantes (5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5).

4.3.3.3 Ensaio de cântabro

Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada teor de ligante, totalizando 15 corpos de prova para cada tipo de mistura. Foi determinado o volume de vazios utilizando o método de ensaio DNER-ME 117/94. A Figura 4.95 mostra o ensaio para a determinação da porcentagem de vazios comunicantes cujo valor foi calculado segundo a equação 2.23. A Figura 4.96 mostra os corpos de prova antes e depois do ensaio de cântabro. Os Quadros 4.56 e 4.57 e as Figuras 4.97 e 4.98 apresentam os resultados dos ensaios realizados para as duas misturas asfálticas.

Figura 4.95 - Ensaio para determinação da porcentagem de vazios comunicantes



Figura 4.96 - Aspectos dos corpos de prova após o ensaio de cântabro

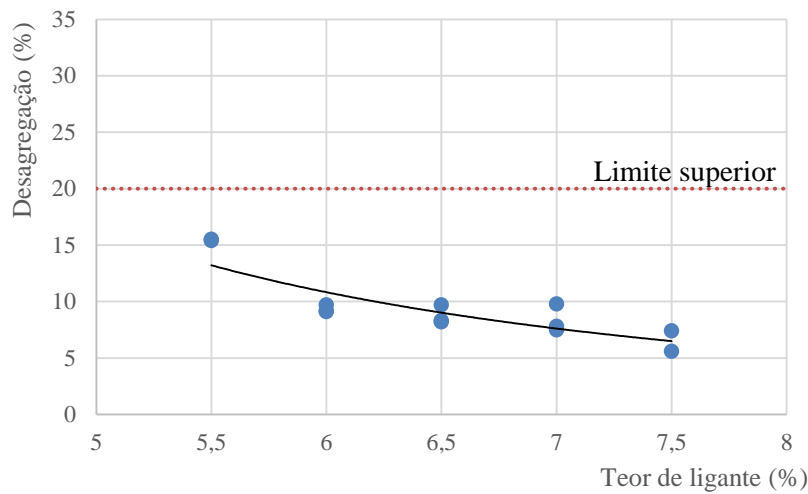


Quadro 4.56 - Resultados do ensaio de cântabro da mistura I

Mistura asfáltica I TMA (4,8 mm)				
% de Ligante	CPs	Volume de vazios (%)	Vazios Comunicantes (%)	Cântabro (%)
5,5	1	_*	_*	_*
	2	17,70	4,74	15,5
	3	19,36	3,02	15,4
6,0	4	17,86	3,82	9,1
	5	17,50	2,46	9,2
	6	17,47	3,60	9,7
6,5	7	17,06	3,37	9,7
	8	15,58	4,00	8,3
	9	16,23	3,84	8,2
7,0	10	17,11	3,97	7,8
	11	14,52	3,08	7,5
	12	16,24	3,20	9,8
7,5	13	15,90	2,76	7,4
	14	15,61	4,01	5,6
	15	_*	_*	_*

*amostra danificada

Figura 4.97 - Resultados do desgaste para os corpos de prova da mistura I

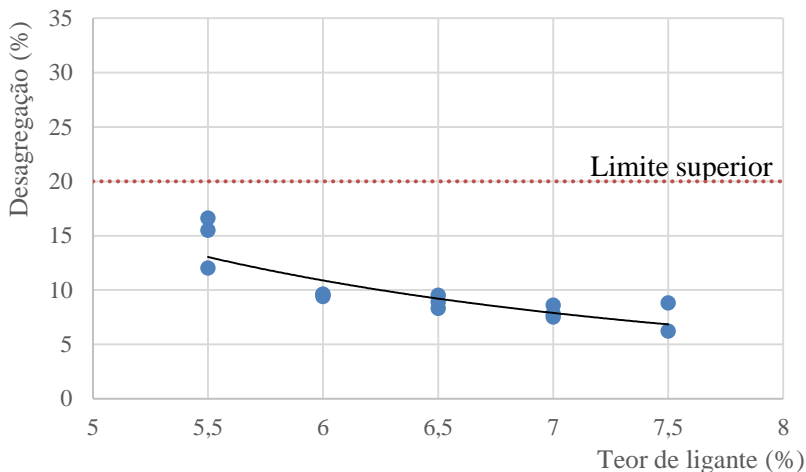


Quadro 4.57 - Resultados do ensaio de cântabro da mistura II

Mistura asfáltica II TMA (6,3 mm)				
% de Ligante	CPs	Volume de vazios (%)	Vazios Comunicantes (%)	Cântabro (%)
5,5	1	15,99	10,58	16,6
	2	17,47	11,52	15,5
	3	17,70	13,69	12,0
6,0	4	15,49	11,57	9,4
	5	15,05	10,77	9,6
	6	15,26	9,18	9,6
6,5	7	17,09	12,64	8,9
	8	16,03	10,86	8,3
	9	14,32	11,18	9,5
7,0	10	16,57	12,57	8,6
	11	-*	-*	-*
	12	14,77	10,34	7,8
7,5	13	-*	-*	-*
	14	14,51	8,68	6,2
	15	14,84	11,22	8,8

*amostra danificada

Figura 4.98 - Resultados do desgaste para os corpos de prova da mistura II



Os resultados dos Quadros 4.56 e 4.57 mostram que todos os corpos de prova ficaram abaixo do limite aceitável do desgaste de Cântabro de 20%, que é o limite segundo especificações da norma ASTM D7064. Como esperado, mantendo-se a granulometria, a porcentagem de volume de vazios diminui como o aumento da porcentagem do ligante asfáltico.

Com o objetivo de aumentar a resistência da mistura asfáltica adotou-se, portanto, o teor de ligante ótimo de 6,0% para as duas misturas. Com isso, a porcentagem de volume de vazios médio seria de 17,6% e de vazios comunicantes de 3,3% para a mistura I. Para a mistura II adotou-se porcentagem de volume de vazios médio seria de 15,3% e de vazios comunicantes de 10,5%.

Os resultados do ensaio da porcentagem de vazios comunicantes da mistura I foram baixos em relação aos da literatura quando comparados com os revestimento drenantes. Entretanto, essa porcentagem é suficiente para que ajude na absorção sonora e ainda contribua na drenabilidade da água em dias de chuva.

Os resultados da porcentagem de vazios comunicantes da mistura II foram maiores que os da mistura I mesmo com um volume de vazios um pouco menor. Isso pode ser explicado pela granulometria diferente, ao passo que a mistura II apresenta um tamanho máximo do agregado maior com um gap superior nas peneiras intermediárias.

4.3.3.4 Ensaio de dano por umidade induzida

Com o teor ligante ótimo definido foi realizado o ensaio de Lottman (determinação do dano por umidade induzida) para cada mistura. Este ensaio é realizado segundo a norma AASHTO T 283, a qual prevê a moldagem de seis corpos de prova Marshall com volume de vazios de $7,0 \pm 0,5\%$.

Entretanto, segundo a NCHRP (2009), por se tratar de uma mistura porosa, os corpos de prova foram moldados no compactador Giratório com o molde de 10 cm de diâmetro, controlando a altura do corpo de prova (número de giros) para que se atinja a mesma porcentagem de volume de vazios da dosagem da mistura. Foram moldados 6 corpos de prova para cada mistura, sendo que 3 passam pelo processo de condicionamento previsto no método.

A relação entre a resistência média dos corpos de prova condicionados com a resistência dos corpos de prova não condicionados deverá ser maior a 0,8, que é o mínimo exigido pela norma ASTM D7064. O Quadro 4.58 mostra o resumo dos resultados.

Quadro 4.58 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida.

Tipo de mistura		Cp	Vv (%)	Resistência à tração (MPa)	Média	Relação entre as resistências
Mistura I	Condicionada	1	17,77	0,96	0,99	84 %
		2	17,73	0,99		
		3	18,36	1,01		
	Não condicionada	4	18,91	1,15	1,17	
		5	17,98	1,19		
		6	17,97	1,17		
Mistura II	Condicionada	1	15,63	1,31	1,26	93 %
		2	13,87	1,29		
		3	13,96	1,18		
	Não condicionada	4	13,73	1,43	1,36	
		5	15,45	1,28		
		6*				

*amostra danificada

Para as duas misturas asfálticas os resultados do ensaio de Lottman ficaram acima do limite mínimo de 80%. Os resultados de resistência à tração apresentados estão bem acima de uma mistura drenante que comumente se encontra na literatura, com uma resistência à tração

indireta de apenas 0,6 Mpa. Essa resistência maior da mistura de baixo ruído pode ser explicada pela menor porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes, por utilizar um ligante modificado e ainda pelo acréscimo do melhorador de adesividade.

4.3.4 Moldagem das placas e ensaios de deformação permanente e drenabilidade

Foram moldadas duas placas para cada mistura asfáltica no teor de ligante considerado ótimo, utilizando-se o compactador de placas LCPC de acordo com a norma Francesa AFNOR NF P-98-250-2. Para simular a compactação de uma mistura porosa em campo que, utiliza apenas rolo de chapa liso, foi utilizada, na compactação das placas, uma chapa lisa metálica. A Figura 4.99 mostra as placas moldadas. O Quadro 4.59 apresenta a porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes.

Figura 4.99 - Placas moldadas para ensaios de deformação permanente



Quadro 4.59 - Resultados do volume de vazios e vazios comunicantes das placas

Placa		Volume de vazios (%)	Vazios comunicantes (%)
Mistura I	1	21,75	14,23
	2	22,36	15,35
Mistura II	3	19,11	16,74
	4	20,25	17,46

Os resultados mostram que a porcentagem de volume de vazios para as duas misturas ficaram um pouco maiores que o previsto. Para a mistura I se previa um valor próximo à 17,61% e para a mistura II, um valor aproximado de 15,27%. A moldagem foi realizada controlando-se a

altura da placa que deveria apresentar o valor de 5,0 cm. Entretanto todas as pacas ficaram com altura levemente maior (5,1 cm), o que acarretou na maior porcentagem de volume de vazios.

A porcentagem do volume de vazios das duas misturas foram maiores nas placas moldadas na mesa compactadora quando comparados com a dos CPs moldados na PCG, justificado pela maior altura da placa do que os 5,0 cm estipulados na dosagem, enquanto que na PCG a altura dos CPs foram atingidas. Entretanto, o alto valor da porcentagem de vazios comunicantes sugere que os arranjos dos agregados estão dispostos diferentemente em relação à compactação realizada com a PCG, como foi demonstrado por Ribas (2016), em sua dissertação. O Quadro 4.60 apresenta a comparação entre a porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes médios dos dois métodos de compactação.

Quadro 4.60 - Resumo da porcentagem dos volumes de vazios e vazios comunicantes dos corpos de prova.

Placa (LCPC)				PCG			
Mistura I		Mistura II		Mistura I		Mistura II	
VV %	VC %	VV %	VC %	VV %	VC %	VV %	VC %
22,05	14,79	19,68	17,10	17,61	3,29	15,26	10,50

4.3.4.1 Caracterização da drenabilidade

Para cada placa foram realizados três ensaio em pontos diferentes das placas, pois, dificilmente a compactação é homogênea em todos os pontos.

A drenabilidade é medida em cm/s e calculada através da equação 2.25. Segundo a norma NLT-327/00 o ensaio consiste em marcar os segundos que levam para uma coluna de água padronizada passar pela mistura asfáltica (Figura 4.100). O Quadro 4.61 apresenta os resultados da drenabilidade (k) calculada em cm/s.

Figura 4.100 - Ensaio de drenabilidade



Quadro 4.61 - Resultados do ensaio de drenabilidade das placas

Placa		k (cm/s)	Média (cm/s)
Mistura I	1	0,39	0,40
	2	0,40	
Mistura II	1	0,65	0,62
	2	0,58	

Os resultados do ensaio mostram que os valores do k ficaram apropriados para uma mistura porosa de acordo com as diretrizes da NCAT que sugere o valor mínimo de 0,12 cm/s.

4.3.4.2 Ensaio de deformação permanente

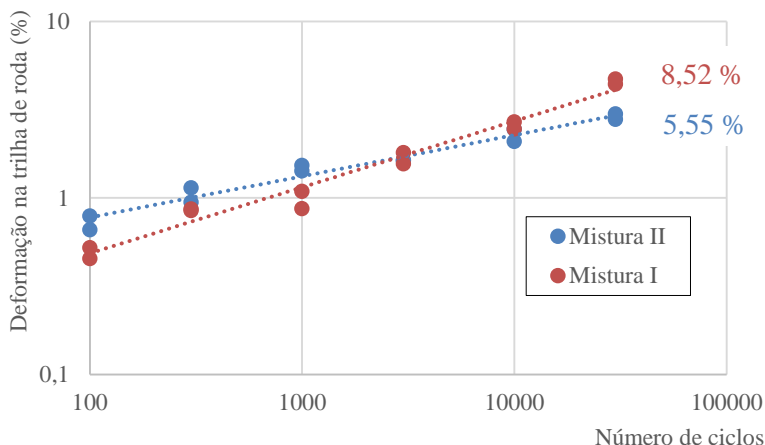
O ensaio de deformação permanente foi realizado de acordo com a norma NF P 98-253-1 (AFNOR, 1991). Foram aplicados 30.000 ciclos (60.000 passadas do pneu) nas placas a uma temperatura de 60°C em que o limite aceitável à deformação permanente obtida no simulador de tráfego é de 10% em relação a espessura da placa. Entretanto, esse limite admissível de deformação permanente é definido para os carregamentos da frota veicular da França, onde o eixo padrão de solicitação é 130 kN. No Brasil, a carga legal chega a 110 kN. Sendo assim, o ensaio retrata uma condição mais severa do que para as rodovias brasileiras, embora não se tenha um controle rigoroso das cargas que trafegam sobre elas.

O ensaio ocorre a uma frequência de 1 Hz, onde cada ciclo corresponde a duas passadas do pneu que possui um carregamento de 5 kN com pressão de 0,6 MPa. A deformação é medida em 15 pontos distintos da placa e a média destas medidas é comparada com a média das leituras iniciais (ciclo zero).

Esse ensaio é de extrema importância visto que as misturas de baixo ruído são utilizadas como camadas de rolamento de pequena espessura assentadas, geralmente, sobre camadas de mistura asfáltica densa e o dimensionamento é feito para apenas as forças de compressão serem atuantes nessa camada.

A Figura 4.101 apresenta os resultados do ensaio de deformação permanente.

Figura 4.101 - Desempenho à deformação permanente



Os resultados mostram que mistura asfáltica com tamanho máximo do agregado maior apresentou melhor desempenho à deformação permanente. No entanto, as duas misturas apresentaram valores abaixo do limite aceitável de 10%.

4.3.5 Ensaio de absorção sonora

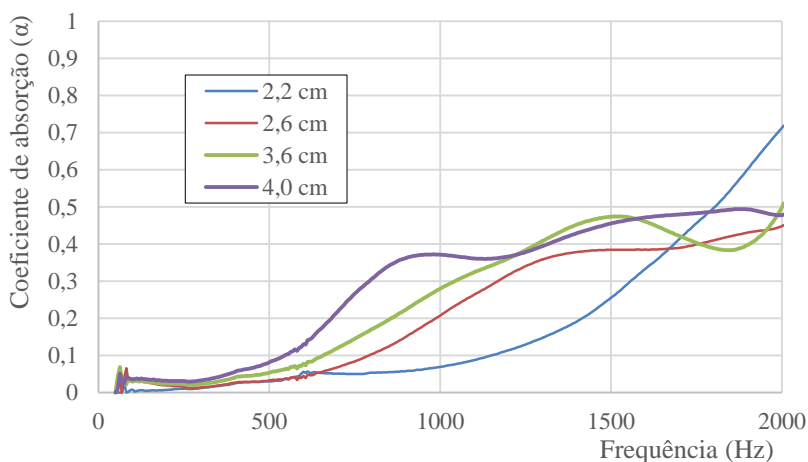
Foram moldados quatro corpos de prova de cada mistura asfáltica no teor de ligante ótimo para diferentes espessuras com o objetivo de verificar a absorção sonora. A princípio, cada corpo de prova seria moldado separadamente na PCG, entretanto o equipamento não permite

que sejam confeccionados corpos de prova com altura inferior a 5 cm. Com isso, foram moldados corpos de prova com alturas superiores a 5 cm para que fossem posteriormente serrados. Os CPs foram lavados e secos antes de serem colocados no tubo de impedância para eliminar o pó nos poros deixados pela serra de corte. Também se teve o cuidado de colocar a superfície serrada voltada para o fundo do tubo.

- *Mistura asfáltica I*

A Figura 4.102 mostra os resultados do ensaio de absorção sonora para as diferentes espessuras da mistura asfáltica do tipo I. A mistura possui tamanho máximo do agregado de 4,8 mm com porcentagem de volume de vazios de 16,55 % e de volume de vazios comunicantes de 3,44 %.

Figura 4.102 - Curvas de absorção sonora da Mistura I



Os resultados apresentados na Figura 4.102 mostram que a absorção sonora é maior na frequência de 1000 Hz para o corpo de prova de 4,0 cm. A amostra de 2,2 cm apresenta o maior pico de absorção sonora (0,71) na frequência de 2000 Hz. Entretanto, na frequência de 1000 Hz é a que tem o menor valor (0,06).

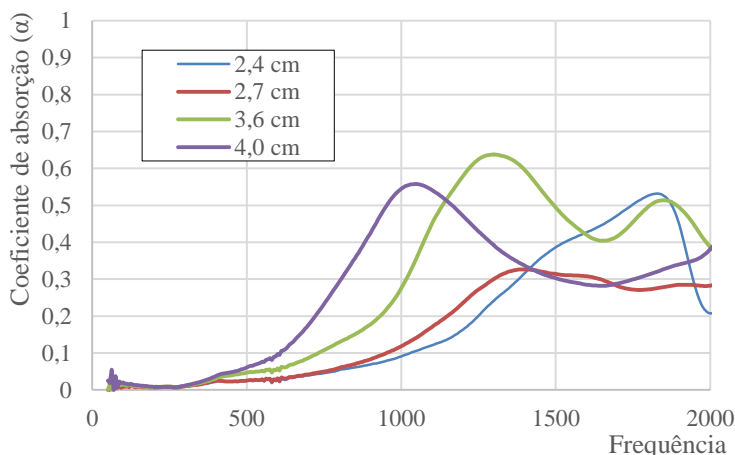
Superfícies de baixa emissão de ruído são aquelas que conseguem absorver o som, sendo ideal maximizar a absorção sonora na região de frequência de 800 a 1000 Hz onde o ruído é mais prejudicial ao ouvido humano. Portanto, para a mistura asfáltica do tipo I a espessura de 4,0 cm seria a ideal para a redução do ruído pneu-pavimento da parcela de

bombeamento de ar, pois, é a que apresenta o maior coeficiente de absorção na frequência entre 800-1000 Hz.

- Mistura asfáltica II

A Figura 4.103 apresenta as curvas de absorção sonora da mistura asfáltica do tipo II para diferentes espessuras. A mistura asfáltica tem tamanho máximo do agregado de 6,3 mm com volume de vazios de 13,55 % e volume de vazios comunicantes de 8,31 %.

Figura 4.103 - Curvas de absorção sonora da Mistura II



A amostra com espessura 3,6 cm apresenta o maior pico de absorção (0,63). No entanto, na frequência de 1000 Hz seu coeficiente não chegou a 0,3 de acordo com a Figura 4.103. A espessura ideal para redução do ruído pneu-pavimento, ou seja, em que o pico de absorção sonoro fique na frequência de 800-1000 Hz, seria de 4,0 cm (0,55).

4.3.6 Escolha da mistura asfáltica de baixo ruído

Para a escolha da mistura asfáltica de baixo ruído foram analisados todos os ensaios realizados nos corpos de prova e placas. Primeiramente, foi verificada a resistência mecânica das duas misturas asfálticas. O Quadro 4.62 mostra o resumo comparativo dos resultados dos ensaios mecânicos das duas misturas estudadas, para teor de ligante de 6,0%.

Quadro 4.62 - Resumo dos resultados mecânicos para as misturas I e II.

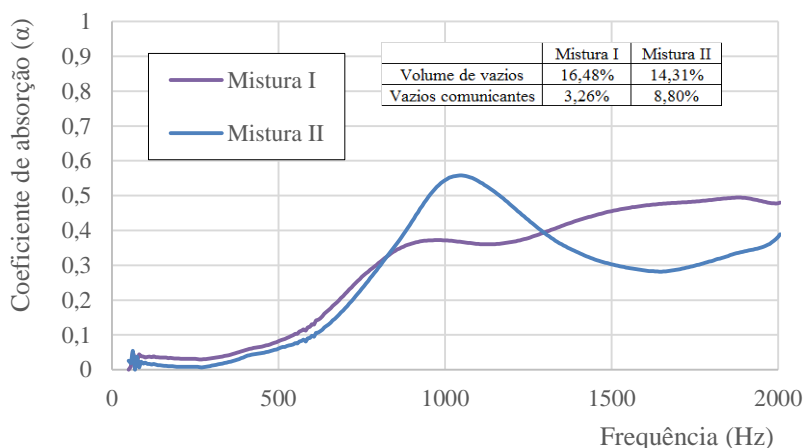
Ensaio	Cântabro (%)	RT (MPa)	Lottman (%)	Deformação Permanente (%)
Mistura I	9,3	1,17	84	8,52
Mistura II	9,5	1,36	93	5,55

De acordo com o Quadro 4.62 as duas misturas asfálticas apresentaram excelentes resultados mecânicos. Ambas misturas poderiam ser empregadas em campo.

Também foi verificada a drenabilidade das duas misturas asfálticas, cujos resultados já foram apresentada no Quadro 4.61. Os resultados foram satisfatórios para ambas as misturas, indicando que elas teriam eficiência na eliminação da película do filme d'água no revestimento do pavimento em dias chuvosos.

No ensaio de absorção sonora foi determinada a espessura ideal para cada mistura. A Figura 4.104 mostra a curva de absorção de cada mistura asfáltica na sua espessura ideal.

Figura 4.104 - Curva de absorção sonora da Mistura I e II



De acordo com a Figura 4.104 a mistura II apresenta o maior coeficiente de absorção sonora na frequência crítica para o ouvido humano (800-1000 Hz). Apesar de apresentar uma porcentagem de volume de vazios menor que a mistura I, a mistura II possui porcentagem de volume de vazios comunicantes maior o que explica o pico de absorção sonora maior. Portanto, das duas misturas estudadas a mistura II

propiciaria uma maior redução do ruído pneu-pavimento, gerado pelos mecanismos aerodinâmicos.

Entretanto, de acordo com a literatura internacional (Hanson *et al.*, 2005 e Li *et al.* 2014) misturas asfálticas que apresentem coeficiente de absorção sonora acima de 0,3 na frequência entre 800-100 Hz já são considerados de baixa geração do ruído pneu-pavimento relativa a parcela aerodinâmica. Desta forma, tanto a mistura I quanto a II podem ser consideradas misturas com potencial para a obtenção de revestimentos de baixo ruído.

Todavia, também de acordo com a literatura (FEHRL, 2006 e Sandberg *et al.*, 2011) misturas com menores tamanho máximo de grãos tenderão a propiciar uma menor geração de ruído em campo, propiciado pelos mecanismos mecânicos. Assim, a mistura I tenderia a apresentar uma menor geração de ruído mecânico em campo.

Considerando-se então os resultados obtidos, ponderando-se os aspectos positivos e negativos de cada mistura estudada, acredita-se que a diferença no tamanho máximo dos agregados de 4,8 mm (mistura I) para 6,3 mm (mistura II) não tenha muita influência no aumento da parcela do ruído mecânico. Desta forma, considerando-se a maior capacidade de absorção sonora da mistura II, a sua maior porcentagem de volume de vazios comunicantes e sua menor deformação permanente, que é, fundamental para a manutenção do volume de vazios ao longo do tempo devido a ação do tráfego, acredita-se que a mistura II vai propiciar em campo uma maior redução da geração do ruído pneu-pavimento.

Comparando-se os resultados da mistura II com os resultados da mistura tipo CPA aplicado no segmento teste da BR 282, acredita-se que a mistura II tenderá a apresentar uma redução de ruído acima de 5 dB(A) pelo fato de apresentar um tamanho máximo de agregado muito menor.

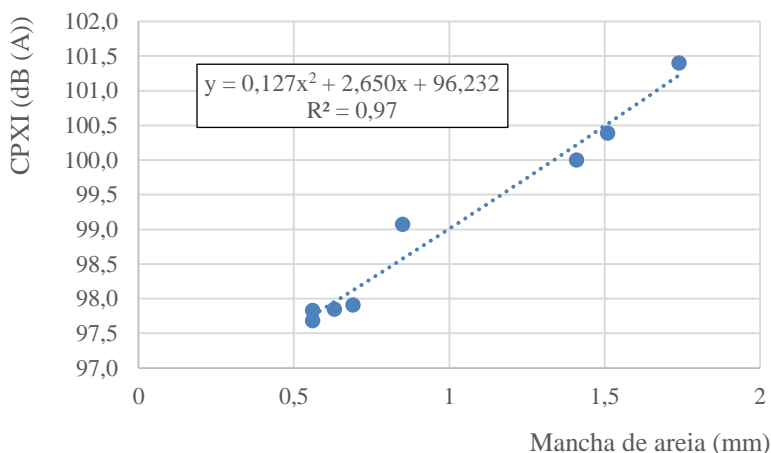
4.4 MODELAÇÃO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO

A macrotextura tem influência nos resultados dos níveis de pressão sonora. Quanto maior a altura da macrotextura maior é o ruído provocado pelo mecanismo mecânico principalmente de impactos e choques nas faixas de baixa frequência. Observa-se, também, que o coeficiente de absorção sonora que está relacionado diretamente com a porcentagem de volume de vazios comunicantes, ajuda na diminuição do ruído gerado pela parcela aerodinâmica de bombeamento do ar. Algumas pesquisas mostram, também, que o tamanho máximo do agregado tem influência na geração do ruído do pneu-pavimento, mostrando que quanto menor o tamanho máximo do agregado menor é ruído pneu-pavimento.

Na tentativa de relacionar os resultados da macrotextura, absorção sonora e tamanho máximo do agregado com os níveis de pressão sonora foram realizados alguns tratamentos estatísticos dos resultados obtidos neste trabalho na tentativa de se buscar uma previsão do ruído gerado CPXI pela superfície a partir do conhecimento da textura, capacidade de absorção sonora e tamanho máximo do agregado.

Primeiramente, foi correlacionada a textura do revestimento com o nível de pressão sonora das misturas asfálticas. A Figura 4.105 apresenta o gráfico com os resultados. Os resultados mostram uma boa correlação com o valor CPXI tendendo para o valor de 96 dB(A) quando a textura se aproxima de uma mistura lisa.

Figura 4.105 - CPXI em função da macrotextura do revestimento



Com os valores medidos de absorção sonora dos corpos de prova extraídos em campo da mistura asfáltica do tipo CPA e ainda com a porcentagem dos volumes de vazios e vazios comunicantes, junto com as informações dos projetos das misturas dos demais revestimentos, foi possível apresentar modelos para prever a redução do ruído pneu-pavimento da parcela de geração aerodinâmica. As Figuras 4.106, 4.107 e 4.108 apresentam a relação entre o índice acústico CPXI e a porcentagem do volume de vazios, dos vazios comunicantes e do pico de absorção sonora entre a frequência de 1000 Hz.

Figura 4.106 - Estimativa do índice acústico CPXI em função do pico de absorção sonora

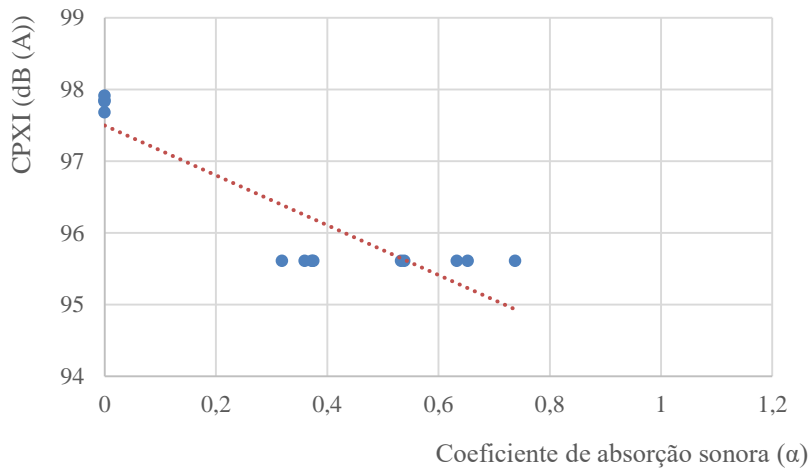


Figura 4.107 - Estimativa do índice acústico CPXI em função do volume de vazios

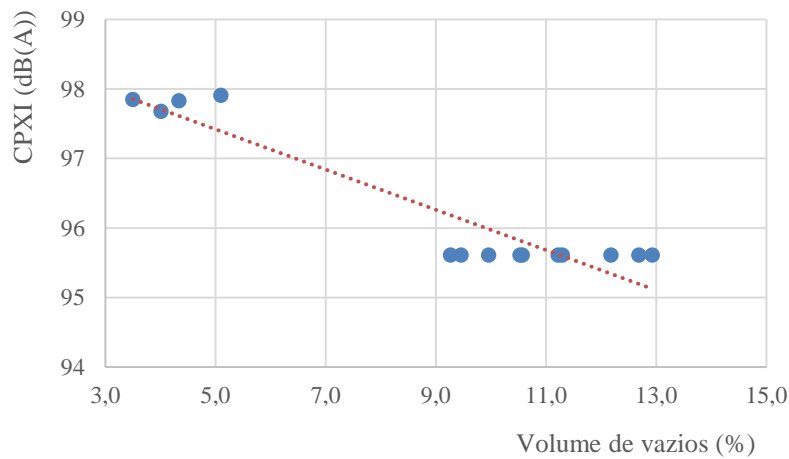
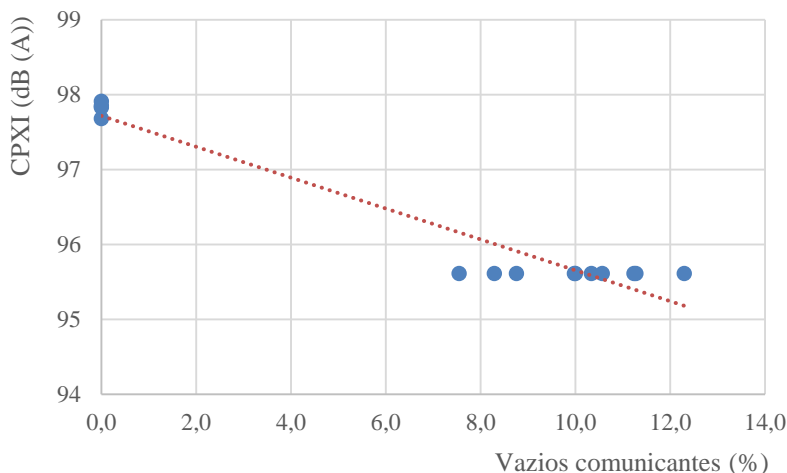


Figura 4.108 - Estimativa do índice acústico CPXI em função da porcentagem de vazios comunicantes



Não foi possível verificar a influência do tamanho máximo do agregado na geração do ruído pneu-pavimento, pois a maioria das misturas estudadas possuem o mesmo tamanho máximo do agregado, impossibilitando algum tipo de análise estatística.

Analizando-se todos os resultados foi possível desenvolver três modelos de previsão do índice final do ruído pneu-pavimento (CPXI) em função de duas variáveis. O primeiro modelo apresenta a estimativa de CPXI em função da macrotextura e do pico de absorção sonora na frequência de 1000 Hz. O segundo, possibilita a estimativa CPXI em função da macrotextura e da porcentagem de volume de vazios. O terceiro modelo estima-se o CPXI em função da macrotextura e da porcentagem de vazios comunicantes. As equações 4.2, 4.2 e 4.3 apresentam os modelos respectivamente. Entretanto, os modelos devem ser utilizados apenas para misturas asfálticas com características muito próximas das misturas estudadas, pois devido a baixa quantidade de ensaios a extrapolação dos resultados não é confiável.

Para as misturas porosas, lembra-se que os modelos foram desenvolvidos considerando uma altura da macrotextura de 0,56 mm. Como o ensaio de mancha de areia não consegue caracterizar a textura do revestimento poroso, considerou-se a textura mais lisa encontrada nos revestimentos densos estudados para que se buscasse a influência somente da porosidade do revestimento na geração do ruído aerodinâmico.

$$CPXI = 0,127MA^2 + 2,650MA + 96,232 - 3,476\alpha \quad (4.2)$$

onde:

CPXI: nível de pressão sonora final do Trailer-CPX em dB(A) para velocidade de 80 km/h;

MA: altura do ensaio de mancha de areia em (mm) (0,56 para misturas porosas);

α : coeficiente de absorção sonora na frequência de 1000 Hz (valores de 0 a 1).

$$CPXI = 0,127MA^2 + 2,650MA + 96,232 - 0,289VV \quad (4.3)$$

onde:

CPXI: nível de pressão sonora final do Trailer-CPX em dB(A) para velocidade de 80 km/h;

MA: altura do ensaio de mancha de areia em (mm) (0,56 para misturas porosas);

VV: porcentagem de volume de vazios (%).

$$CPXI = 0,127MA^2 + 2,650MA + 96,232 - 0,206VC \quad (4.4)$$

onde:

CPXI: nível de pressão sonora final do Trailer-CPX em dB(A) para velocidade de 80 km/h;

MA: altura do ensaio de mancha de areia em (mm) (0,56 para misturas porosas);

VC: porcentagem de volume de vazios comunicantes (%).

A partir dos modelos de previsão é possível se estimar o índice acústico CPXI para as duas misturas estudadas no item 4.3 deste trabalho, considerando-se a hipótese da altura da macrotextura de classificação média de 0,56 mm. Contudo, a influência da macrotextura na geração do ruído mecânico para as duas misturas, tende a ser menor, pois apresentam tamanho máximo do agregado menor que a CPA, que é a mistura porosa utilizada para o desenvolvimento dos modelos. Também é apresentado a aplicação do modelo na CPA. O Quadro 4.63 apresenta o resumo dos cálculos realizados.

Quadro 4.63 - Modelação do ruído pneu-pavimento para as misturas I e II.

Mistura asfáltica	α	MA (mm)	VV (%)	VC (%)	CPXI (dB (A))		
					Mod 1	Mod 2	Mod 3
Mistura I	0,37	0,56	16,48	3,26	96,47	92,99	97,08
Mistura II	0,54	0,56	14,31	8,80	95,88	93,62	95,94
CPA	0,51	0,56	11,29	9,58	95,98	94,49	95,78

Analisando os resultados, acredita-se que os modelos 1 e 3 seriam os melhores para a predição do índice acústico CPXI de misturas asfálticas. Para a mistura CPA os modelos 1 e 3 apresentaram o valor do CPXI muito próximos do valor medido em campo (95,61 dBA).

Apesar dos modelos apresentarem o valor do CPXI da mistura II muito próximos da mistura CPA, lembra-se que os modelos não levam em consideração o tamanho máximo do agregado, que está diretamente relacionado com a parcela de redução do ruído mecânico. Portanto, por apresentar um tamanho máximo do agregado menor que a CPA, acredita-se que a mistura II tenha uma redução do índice acústico CPXI maior.

Com diversos resultados dos níveis de pressão sonora em função da frequência foi possível prever o comportamento acústico do revestimento asfáltico com mistura densa para duas faixas de macrotextura, medidas no ensaio de mancha de areia: de 1,69 a 1,74 mm; e de 0,56 a 0,69 mm. A curva é válida para prever o comportamento de misturas asfálticas com volume de vazios abaixo de 5,1 %. A Figura 4.109 e 4.110 apresentam os níveis de pressão sonora em função da frequência para os dois pneus de referência para as duas faixas de macrotextura.

Figura 4.109 - NPS para faixa de macrotextura de 1,69 a 1,74 mm

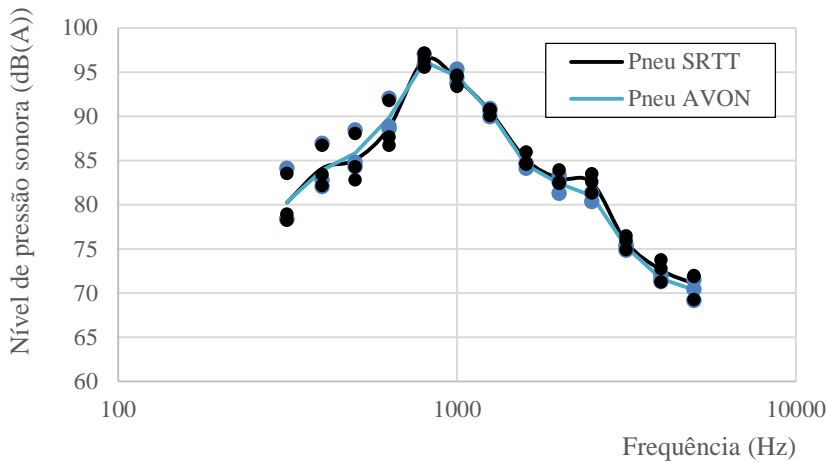
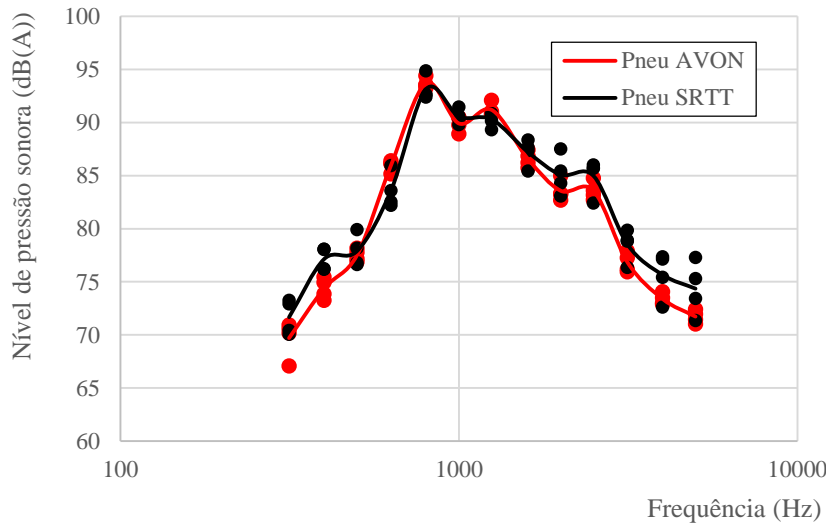


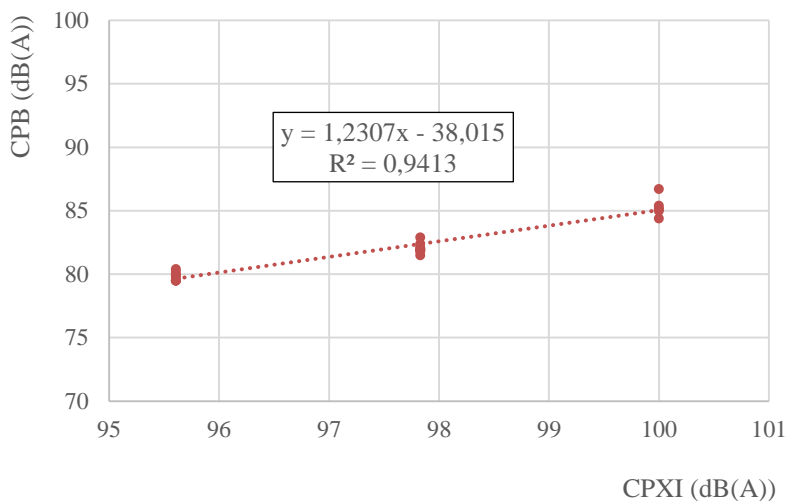
Figura 4.110 - NPS para faixa de macrotextura de 0,56 a 0,69 mm



Knabben (2012), realizou medições do ruído pneu-pavimento, utilizando o método CPB, em 3 revestimentos asfálticos (Beira-Mar UFSC sentido centro, Beira-Mar com asfalto-borracha e a CPA) que foram realizadas as medições com o Trailer-CPX. A partir dos resultados

do método CPB e do índice CPXI foi possível encontrar uma correlação entre os dois métodos. A Figura 111 mostra a correlação dos resultados.

Figura 4.111 - Relação entre o método CPB e o CPX



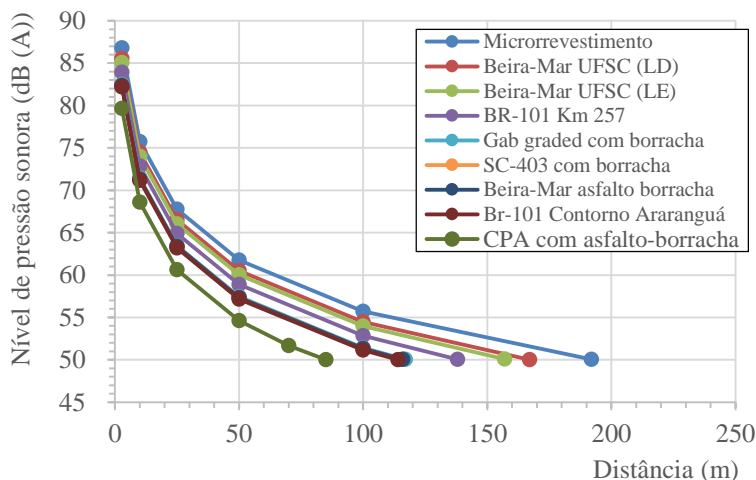
Através dessa relação é possível estimar a distância mínima necessária de uma rodovia, com limite de velocidade de 80 km/h, de um conjunto residencial levando em conta os critérios da NBR 10151/2000.

Portanto, com o valor do CPXI de 95,61 dB(A) (CPA), por exemplo, teria um valor de 79,65 dB(A) para o método CPB que tem o sonômetro instalado à 2,8 m do eixo do veículo. Calculando a distância para que se tenha 50 dB(A) (valor máximo em área residencial de acordo com NBR 10151/2000 em período noturno) em frente das residências, seria necessário uma distância de 85 metros em relação a rodovia. Os cálculos foram realizados considerando a fonte de ruído pontual. O Quadro 4.64 apresenta as distancias mínimas para cada revestimento asfáltico estudado. A Figura 4.112 mostra a atenuação do ruído em função da distância para cada tipo de mistura asfáltica estudada.

Quadro 4.64 - Distância mínima de conforto à comunidade lindeira para velocidade do tráfego de 80 km/h.

Revestimento	CPXI (dB(A))	CPB (dB(A))	Dist. mínima para área mista predominantemente residencial (m) (máx. 50 dB(A))
Microrrevestimento	101,40	86,78	192
Beira-Mar UFSC Sentido Centro	100,39	85,53	167
Beira-Mar UFSC Sentido UFSC	100,00	85,06	157
BR-101 Km 257	99,07	83,91	138
Gap Graded com asfalto-borracha - Criciúma	97,91	82,48	117
SC-403 Florianópolis com asfalto-borracha	97,85	82,41	116
Beira-Mar, Asfalto- Borracha	97,83	82,38	116
BR-101 Contorno de Araranguá	97,68	82,20	114
CPA com asfalto- borracha (Campos Novos – Lages)	95,61	79,65	85

Figura 4.112 - Atenuação do ruído em função da distância



Os resultados do Quadro 4.64 mostram, por exemplo, que a utilização do revestimento do tipo CPA ao invés do microrrevestimento, acarretaria na redução de 107 metros da distância mínima da rodovia em relação a um conjunto residencial. Portanto, 107 metros a mais ao longo da rodovia para a ocupação de um conjunto residencial.

Na Avenida Beira-Mar em Florianópolis, as residências ficam muito próximas a rodovia, gerando desconforto aos moradores além de possíveis doenças e perturbações no sono. Moradores dessa região já investem em tratamentos acústicos em suas residências na tentativa de reduzir o ruído proveniente do tráfego. A Figura 4.113 apresenta a distância da rodovia (da faixa com velocidade próxima a 80 km/h) a uma edificação em construção. Na hipótese da Avenida Beira-Mar ter uma mistura asfáltica do tipo CPA a distância da edificação poderia ficar à 85 metros da rodovia, entretanto com a mistura lá aplicada, a distância mínima da edificação deve ser de 116 metros.

Figura 4.113 - Distância das edificações à Avenida Beira-Mar.



Na SC-403, a escola Luiz Candido Luz não atende a distância mínima necessária para o conforto acústico prescrito na NBR 10151/2000, prejudicando, provavelmente o aprendizado de seus alunos. A distância mínima aconselhável seria de 116 metros como é apresentado na Figura 4.114. Além da utilização de uma mistura de baixa emissão de ruído (CPA), que passaria para 85 metros a distância mínima da rodovia à escola, a utilização de barreiras acústicas e o controle da velocidade nessa área poderiam solucionar o problema, sem que precisasse mexer na posição da escola.

Figura 4.114 - Distância da escola Luiz Candido Luz à SC-403.



CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

O Trailer-CPX Brasileiro foi construído e qualificado de acordo com norma ISO 11819-2 (2010) e todos os resultados das medições realizadas para a sua certificação foram atendidos. O equipamento representa o primeiro trailer construído no Brasil e que atende as especificações europeias para medição do ruído pneu-pavimento.

Foram desenvolvidas duas misturas asfálticas de baixo emissão de ruído em laboratório. Ponderando-se os aspectos positivos e negativos de cada mistura estudada, acredita-se que a mistura II vai propiciar em campo uma maior redução da geração do ruído pneu-pavimento. A mistura II apresentou maior capacidade de absorção sonora, maior porcentagem de volume de vazios comunicantes e menor deformação permanente. Apesar da diferença no tamanho máximo dos agregados de 4,8 mm (mistura I) para 6,3 mm (mistura II), acredita-se que isso não tenha muita influência no aumento da parcela do ruído mecânico.

Nas amostras extraídas em campo da mistura asfáltica do tipo CPA o ensaio de absorção sonora mostrou uma boa capacidade da mistura em reduzir os ruídos de geração aerodinâmica. Os picos de absorção foram altos e estiveram entre 800 e 1100 Hz. Apesar de apresentar uma redução da porcentagem do volume de vazios, devido à pós compactação e a colmatação da mistura ao longo dos anos, o excelente resultado no ensaio de absorção sonora pode ser explicado pela alta porcentagem de vazios comunicantes ainda presentes na mistura, ou seja, os vazios que ainda existem na mistura, quase que em totalidade, são comunicantes.

As medições do ruído pneu-pavimento realizada com Trailer-CPX mostraram que a macrotextura das misturas densas tem grande influência na geração do ruído da parcela mecânica. Texturas consideradas positivas, ou seja, com alta rugosidade (como no caso do microrrevestimento) aumentam a geração do ruído da parcela mecânica, principalmente de impactos e choques.

Como era esperado, a camada porosa de atrito (CPA) foi a que apresentou menor índice de ruído (CPXI) quando comparada com os demais revestimentos estudados. Essa redução é explicada pela sua textura negativa que diminui a geração do ruído mecânico e pela porosidade que possibilita a passagem do ar por seus vazios e reduz a parcela de geração do ruído aerodinâmico. Os valores de CPXI para esta mistura foram surpreendentes considerando-se a idade e a região agrícola onde está inserida a rodovia.

Os estudos do nível de pressão sonora em função da frequência mostraram que a rugosidade do revestimento asfáltico está diretamente

relacionada com as frequências abaixo de 800 Hz. Quanto maior a rugosidade maior é o nível de pressão sonora nas baixas frequências.

Para as frequências maiores é a porosidade que influencia no nível de pressão sonora, ao passo que reduz a geração do ruído da parcela aerodinâmica que está diretamente relacionada com as frequências acima de 1000 Hz. Assim, quanto maior a porosidade menor será o nível de pressão sonora nas altas frequências.

Os resultados do ensaio com Trailer-CPX nas superfícies de pavimentos rígidos mostrou que não existiu diferença significativa entre eles nos valores do índice final do ruído (CPXI), mesmo o pavimento microfresado (sentido longitudinal) apresentando uma macrotextura mais rugosa. Acredita-se que a microfresagem no sentido longitudinal não aumenta os mecanismos de geração mecânica do ruído, principalmente a parcela de impactos e choques, em relação aos demais revestimentos.

Estabeleceu-se uma relação entre os resultados do CPXI deste trabalho e dos resultados do método CPB realizado por Knabben (2012).

RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Executar pistas experimentais com misturas asfálticas de baixo ruído e realizar medições com o Trailer-CPX.

Verificar os diferentes métodos de compactação das misturas asfálticas (PCG e mesa compactadora LCPC) e sua influência no coeficiente de absorção sonora. A forma como os grãos são distribuído influencia na resistência ao fluxo de ar e tortuosidade, que por sua vez influencia no coeficiente de absorção sonora.

Realizar medições com o Trailer-CPX em misturas asfálticas com diferentes tamanho máximo do agregado para verificar sua influência na geração do ruído pneu-pavimento.

Adquirir um banco de dados maior de medições com o Trailer-CPX para melhorar a modelagem da equação do ruído pneu-pavimento.

Verificar a macrotextura dos pavimentos porosos através do método do MPD (*Mean Profile Depth*).

REFERÊNCIAS

ABNT - NBR 15184: 2004. **Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004

ABNT - NBR 10151: 2000. **Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento**. Associação Brasileira de Normas técnicas, 2000.

ABNT - NBR 10152: 2000. **Nível de Ruído para Conforto Acústico**. Associação Brasileira de Normas técnicas, 2000.

ABNT - NBR 12.179/1992. **Tratamento acústico em recintos fechados**. Disponível em: <<http://www.vibrasom.ind.br/produtos-acusticos/absorcao-acustica-construcao-civil.php>>. Acesso em: 11 abr. Associação Brasileira de Normas técnicas. 2012.

AFNOR NF P 98-250-2 - **Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage dès Plaques**. Association Française de Normalisation, 1991.

AFNOR NF P 98-254-2. **Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, partie 2**. Association Française de Normalisation, 1993.

AFNOR NF S31-119-2: 2000. **Acoustique – Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – partie 2: Procédure véhicule maîtrisé**. Association Française de Normalisation. Paris, 2000.

ASI, I. M. **Evaluating Skid Resistance of Different Asphalt Concrete Mixes**. Department of Civil Engineering, Hashemite University. Building and Environment. 2007.

ASTM D 4867 M-09. **Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures** ASTM International, DOI: 10.1520/D4867, www.astm.org. 2009

ASTM D 2240-05(2010). **Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness**. DOI: 10.1520/D2240-05R10. www.astm.org. 2010.

ASTM D7064/D7064M - 08. **Standard Practice for Open-Graded Friction Course Mix Design**. DOI: 10.1520/D7064_D7064M-08R13, www.astm.org. 2013.

ASTM E 303-93. **Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**, 1993.

ASTM E 965, 1996. **Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. Annual Book of ASTM Standards, USA, 1996.

ASTM C 522. **Standard test method for airflow resistance of acoustical materials**. 1980.

ASTRANA JÚNIOR, C. A. L., **Estudo da Absorção Sonora e Permeabilidade em Concretos Asfálticos Drenantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006

BABISCH, W.; NEUHAUSER, H.; THAMM, M.; SEIWERT, M. **Blood pressure of 8–14 year old children in relation to traffic noise at home - Results of the German Environmental Survey for Children (GerES IV)**. Science of the Total Environment. Berlin. Alemanha, 2009.

BENDTSEN, H. **Highway Noise Abatement Planning Tools and Danish Examples**. Road Directorate, 2009.

BENDTSEN, H.; ANDERSEN, B. **Noise-Reducing Pavements for Highways and Urban Roads**. State of the Art in Denmark, 2005.

BERENGIER, M.; BESNARD, F.; DUPONT, P.; FÜRST, N.; DOISY, S.; BENSE, P.; MEUNIER, Y.; VERHEE, F. **Influence de la couche de roulement de la chaussée sur le bruit du trafic routier**. Comité français pour les techniques routières, SETRA, 2001.

BERGLUND, B.; LINDVALL, T.; SCHWELA, D. H. **Guidelines for Community Noise**. London, United Kingdom. 1999.

BERNHARD, R. J.; WAYSON, R. L. **A Introduction to tire/pavement noise**. The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways Purdue University, 2005.

BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P., SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Rio de Janeiro, RJ; Brasil, 2008.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. Ed. Blucher, São Paulo, 2006.

BOLTON, J.S.; KANG, Y.J. **Elastic Porous Materials for Sound Absorption and Transmission Control**. SAE Paper. Proceedings of the 1997 Noise and Vibration Conference, 1997.

BUENO, M.; LUONG, J.; VIÑUELA, U.; TERÁN, F.; PAJE, S. E. **Pavement Temperature Influence on Close Proximity Tire/road Noise**. Applied Acoustics. 2011.

BÜHLMANN, E.; ZIEGLER, T. **Temperature Effects on Tyre/Road Noise Measurements and the Main Reasons for Their Variation**. InterNoise. Innsbruck, Austria. 2013.

BÜHLMANN, E.; SCHULZE, S.; ZIEGLER, T. **Ageing Of The New Cpx Reference Tyres During A Measurement Season**. Inter Noise. Austria, 2013.

BURET, M.; MCINTOSH, J.; SIMPSON, C. **Comparative Assessment for Low-Noise Pavements by Means of the ISO 11819 and the OBSI**. InterNoise. Austrália, 2014.

CALLAI, S. C. **Estudo do Ruído Causado pelo Tráfego de Veículos em Rodovias com Diferentes Tipos de Revestimentos de Pavimento**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

CARVALHO, A. **Acústica Ambiental e de Edifícios**. FEUP, 2011.

CERATTI, J. A.; SPECHT, L. P.; KOHLER, R.; KHATCHATOURIAN, O. A.; CALLAI, S. C. **Avaliação do Ruído Causado pelo Tráfego de Veículos em Diferentes Rodovias**, 2009.

CHINA, S.; JAMES, D. E. **Comparison of Laser-Based and Sand Patch Measurements of Pavement Surface Macrotexture**. Journal of Transportation Engineering. 2012

CHO, D.S.; MUN, S. **Study to analyze the effects of vehicles and pavement surface types on noise**. Applied Acoustics, 2008.

CROCKER, M.; HANSON, D. **Measurement of the Acoustical and Mechanical Properties of Porous Road Surfaces and their Relationship to Tire/Road Noise**. Submitted to the Transportation Research Board; 2004.

DAVO, N.C.; ORTS, R.P.; SANCHEZ, E.V.; VICENTE, H.C. **An Experimental Procedure to Obtain Sound Power Level of Tyre/Road Noise Under Coast-By Conditions**. Applied Acoustics, 2013.

DMRB - HD 36/06. Design Manual for Roads and Bridges. **Surfacing Materials for New and Maintenance Construction**. Volume 7, Section 5, 2006.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER-ME 081/98 Método de ensaio - **Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. p. 01/06.

____.DNER - ME 083/98. **Agregados – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

____.DNER - ME 089/94. **Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Rio de Janeiro, 1994.

____.DNER - ME 078/94. **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, 1994.

____.DNER - ME 084/95. **Agregado miúdo - Determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1995.

_____.DNER - ME 035/98 Método de ensaio - **Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles"**. p. 01/06.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT, (2006a). **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ; Brasil.

_____.DNIT (2006b). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, RJ; Brasil, 2006.

_____.DNIT 131/2010 - ME. Materiais asfálticos – **Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola**. Rio de Janeiro, 2010.

_____.DNIT 155/2010 - ME. **Material asfáltico – Determinação da penetração**. Rio de Janeiro, 2010.

DRI. Danish Road Institute. **Clogging of Porous Pavements - International Experiences, Technical Note 55**. 2007.

DUMKE, M. P. **Concreto Asfáltico Drenante com Fibras de Celulose, Ligante Modificado por Polímero e Asfalto-Borracha**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2005.

EPA, US Environmental Protection Agency. **Public health and welfare criteria for noise**, Washington DC, 1973.

45th GRB. **Road vehicle noise reduction by low noise road surfaces in Japan**. Transmitted by expert in japan. 2007.

EJSMONT, J. A. **Tire/Road Noise Generating Mechanisms and Possible Ways of their Reduction**. Proc. of the Second International Seminar TIRE/ROAD NOISE, TUG, Polonia, 1997.

ELISABETE, F.; PEREIRA, P. **Definição e Características de Superfícies de Baixo Ruído**. Universidade do Minho, Dep. de Engenharia Civil. Portugal. 2013.

EVEREST, F. E POHLMANN, K. **The master handbook of acoustics**, McGraw Hill, New York, 2009.

ESTAKHRI, C. K.; ALVAREZ, A. E.; MARTIN, A.E. **Guidelines on Construction and Maintenance of Porous Friction Courses in Texas**. Report No. FHWA/TX-08/0-5262-2. Texas Transportation Institute. 2007.

FEHRL. **Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces**. SILVIA - Sustainable road surfaces for traffic noise control. Brussels, Belgium, 2006.

FERNANDES, A. G. **Impacto de Ruído de Tráfego em Edificações Escolares: Metodologia de Avaliação para Diretrizes de Planejamento Urbano**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2002.

FHWA. **Highway Traffic Noise In The United States. Problem and Response**. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2006.

FISCO, N. R. **Comparison of Macrotexture Measurement Methods**. Universidade do Estado de Ohio. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. 2009.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese (Doutorado). Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina. 2009.

FREITAS, E. F.; PEREIRA, P. A. A.; SANTOS, L. G. P.; SANTOS, A. P. S. **A Influência da Água no Ruído Produzido pelo Tráfego Rodoviário**. 2006.

FREITAS, E.; RODRIGUES, J. D.; ARAÚJO, J.; SILVA, H. **Innovative Low Noise Surfaces – Comparison Of Damping And Absorption**. InterNoise, Melbourne. Austrália, 2014.

GERGES, S. N. Y. **Ruído - Fundamentos e Controle**. 2ª Edição, NR Editora. Florianópolis, 2000.

GERGES, S. N. Y.; ARENAS, J. P. **Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones**. NR Editora, Florianópolis, 2010.

GIESBRECHT, P. K. **Incerteza na Medição das Características Acústicas dos Materiais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

Girard, S. A; Leroux, T.; Verreault, R.; Courteau, M.; Picard, M.; Turcotte, F.; Baril, J.; Richer, O. **Cardiovascular Disease Mortality Among Retired Workers Chronically Exposed to Intense Occupational Noise**. Int Arch Occup Environ Health, 2014.

GOUBERT, L. **Developing a Durable and Ultra Low Noise Poroelastic Pavement**. Belgian Road Research Centre, Belgium. InterNoise, Austrália. 2014.

HANSON, D. I.; DONAVON, P.; JAMES, R. **Tire/pavement noise characteristics for HMA pavements**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Lino Lakes, 2005.

HANSON, D. I.; JAMES, R. S.; NESMITH, C. **Tire/Pavement Noise Study**. National Centes for Asphalt Technology. Alabama. NCAT Report 04-02. 2004.

HANSON, D. I.; PROWELL, B. D. **Evaluation of Circular Texture Meter for Measuring Surface Texture of Pavements**. Auburn University. NCAT Report 04-05. 2004.

HAMET, J. F.; KLEIN, P.; ANTOSSE, F.; DUHAMEL, D.; FADARI, A.; BÉGUET, B. **Road Profile Textura and Tire Noise. Pavement Surface Characteristic**. IV th International Symposium – SURF 2000. Nantes, 2000.

IRALI, F.; GONZALEZ, M.; TIGHE, S. L.; SIMONE, A. **Temperature and Aging Effects on Tire/Pavement Noise Generation In Ontarian Road Pavements**. Transportation Research Board 94th Annual Meeting. EUA. Washington DC, 2015.

IRC. The Indian Roads Congress. **Indian Highways. A Review of Road and Road Transport Development**. 2014.

ISO 10534-2 E: Acoustics -- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 2: Transfer-function method. 1998.

ISO 11819-1: Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: Statistical Pass-By Method. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland, 1997.

ISO 11819-2: Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on traffic noise – Part 2: The Close Proximity Method. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland, 2010.

ISO 13325: Tyres - Coast-by methods for measurement to tyre-to-road sound emission. International Organization for Standardization (ISO). Geneva: ISO, 2003.

JONES, W. **Controlling Highway Noise at the source.** Artigo na APWA- International Public Works and Exposition. Atlanta. Estados Unidos da América, 2004.

JUNGES, P. **Análise de Vibrações de uma Laje Mista de Concreto e Perfis de PRFV Induzidas por Atividades Humanas.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Pos-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. 2010.

JURRIAANS, G.; KEULEN, W. V.; LUBBERHUIZEN, S.; BOKHOVEN, T. V. **New Design of Exposed Aggregate Surface for Northern Entrance of Apeldoorn Constructional and Acoustical Aspects.** Espanha, Sevilha, 2010.

KNABBEN, R.M. **Estudo do Ruído Pneu-Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimentos de Pavimento.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil – PPGEC. Florianópolis, 2012.

KRAGH, J.; BENDTSEN, H.; HILDEBRAND, G. **Noise Classification for Tendering Quiet Asphalt Wearing Courses.** Procedia - Social and Behavioral Sciences. Dinamarca, 2012.

KROPP, W; KIHLMAN, T; FORSSÉN, J; IVARSSON L. **Reduction Potential of Road Traffic Noise**. A Pilot Study. Chalmers University of Technology, 2007.

KUEMMEL, D. A.; SONTAG, R. C.; CROVETTI, G. A.; BECKER, Y.; JAECKEL, J. R.; SATANOVSKY A. **Noise and Texture on PCC Pavements – Results of a Multi-State Study**. Report Number WI/SPR-08-99 Department of Transportation Wisconsin. EUA. 2000.

LANOYE, R.; VERMEIR, G.; LAURIKS, W. **Measuring the Free Field Acoustic Impedance and Absorption Coefficient of Sound Absorbing Materials With a Combined Particle Velocity-Pressure Sensor**. Acoustic Society of America. 2006.

LÁO, V. L. E. S. T. **Estudo Comparativo do Desempenho Acústico de Diferentes Tipos de Revestimento dos Pavimentos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ, Rio de Janeiro. 2004.

LÉDÉE, A. F. **The Propagation Filter Between CPX and CPB Measurements**. Silvia Project Report, LCPC, 2006.

LIAO, G.; SAKHAEIFAR, M. S.; HEITZMAN, M.; WEST, R.; WALLER, B.; WANG, S.; DING Y. **The effects of pavement surface characteristics on tire/pavement noise**. Applied Acoustics. 2014.

LI, M. **Tyre-Road Noise, Surface Characteristics and Material Properties**. Tese de Doutorado. Universidade de Delft. Holanda, 2013.

LI, M.; KEULEN, W. V.; VEN, M. V. V.; MOLENAAR, A.; TANG, G. **Investigation on Material Properties and Surface Characteristics Related to Tyre–Road Noise for Thin Layer Surfacing**. Construction and Building Materials, 2014.

LICITRA, G.; TETI L.; CERCHIAI M. **A Modified Close Proximity Method to Evaluate the Time Trends of Road Pavements Acoustical Performances**. Applied Acoustics, 2014

LOPES, L. F. **Uso de Materiais Porosos em Filtros Acústicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2006.

LU, Q.; LUO, S.; Harvey, J. T. **Compaction of Noise-Reducing Asphalt Mixtures in the Laboratory**. Transportation Research Board 89th Annual Meeting. Washington, D.C. 2010.

LUONG, J.; VÁZQUEZ, V. F.; BUENO, M.; TERÁN, F.; PAJE, S. E. **Influence of Texture Spectra on CPX Noise of SMA Pavements**. Société Française d'Acoustique, Nantes. 2012.

LUONG, J.; BUENO, M.; VÁZQUEZ, V.F.; PAJE S. E. **Ultrathin porous pavement made with high viscosity asphalt rubber binder: A better acoustic absorption?** Applied Acoustics. Elsevier. Espanha 2014.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2014.

MORENO, F.; RUBIO, M.C.; MARTINEZ-ECHEVARRÍA, M.J. **Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes**. Construction and Building Materials, 2011.

MORGAN, P.; SANDBERG, U.; BLOKLAND, G. V. **The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3**. Inter Noise, Ottawa, Canadá, 2009.

NCHRP Report 640 - National Cooperative Highway Research Program. **Construction and Maintenance Practices for Permeable Friction Courses**. WASHINGTON, D.C. 2009.

_____. NCHRP. **Annotated Literature Review for NCHRP Document 138**. EUA. Mississippi. 2009.

_____. NCHRP. **Guide for Pavement Friction**. Web-Only Document 108, 2009.

NELSON, P. M.; PHILLIPS, S. **Designing Porous Road Surfaces to Reduce Traffic Noise**. Transportation Research Laboratory, Crow Thorne, Inglaterra, 1994.

NLT-327/00 **Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS**. CEDEX, 2000.

OLIVEIRA, C. G. M. **Estudo de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

PAJE, S. E.; LUONG, J.; VÁSQUEZ, V.F.; BUENO, M.; MIRÓ, R. **Road Pavement Rehabilitation Using a Binder with a High Content of Crumb Rubber: Influence on Noise Reduction**. Construction and Building Materials. 2013.

PALMER, M. A. **Design and Construction of Porous Asphalt Pavements**. WSU Puyallup Technical Workshop Series-Permeable Paving Design, 2012.

PARRA, L.; CASAS, T.; SOTOMAYOR, R. A. **CPX Noise Measurements in Different Road Surfaces** . Pavement Surface Characteristics Department, CEDEX, Spain. 2012.

PEETERS, B.; KUIJPERS, A. **The Effect of Porous Road Surfaces on Radiation and Propagation of Tyre Noise**. M+P - Consulting Engineers. Acoustics 08 Paris, 2008.

PIARC - **Report of the Technical Committee on Surface Characteristics**. World Road Congress, Marrakesh, 1991.

PUTMAN, B. J. **Evaluation of Open-Graded Friction Courses: Construction, Maintenance, And Performance**. Report No. FHWA-SC-12-04. South Carolina Department of Transportation. US Department of Transportation Federal Highway Administration. Clemson University, 2012

RAITANEN, N. **Measuring of Noise and Wearing of Quiet Surfaces**. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Finlandia, 2005.

RASMUSSEN, R. O.; BERNHARD, R. J.; SANDBERG, U.; MUN, E. P. **The Little Book of Quieter Pavements**. FHWA, USA. FHWA-IF-08-004. 2007.

RENTERGHEN, T. V; BOTTELDOOREN, D. **On the Choice Between Walls and Berms for Road Traffic Noise Shielding Including Wind Effects**. Landscape and Urban Planning, 2012.

RIBAS, C. Y. **Avaliação da Influência do Método de Compactação na Macroestrutura de Misturas Asfálticas Densas Utilizando o Processamento Digital de Imagens**. 251 p. Dissertação (Mestrado) – UFSC. Florianópolis, 2016.

SANDBERG, U. **Asphalt Rubber Pavements in Sweden – Noise and Rolling Resistance Properties**. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI). Inter Noise. Lisboa, Portugal. 2010.

SANDBERG, U. **Tyre/Road Noise - Myths and Realities**. International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Hague, Netherlands, 2001.

SANDBERG, U.; DESCORNET, G. **Road Surface Influence on Tire/Road Noise**. Proceedings Inter-Noise 80. Miami, Estados Unidos da América, 1980.

SANDBERG, U.; EJSBOM, J. **Tyre/Road Noise Reference Book**. Informex, Kista, Sweden, 2002.

SANDBERG, U.; KALMAN, B. **The Poroelastic Road Surface – Results of an Experiment in Stockholm**. SILVIA PROJECT REPORT. Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control, 2006.

SANDBERG, U.; KRAGH, J.; GOUBERT, L.; BENDTSEN, H.; BERGIERS, A.; BILIGIRI, K.P.; KARLSSON, R.; NIELSEN, E.; OLESEN, E.; VANSTEENKISTE, S. **Optimization of Thin Asphalt Layers**. State of the Art Review. Road Research in Europe, 2011.

SANTOS, A. P. S. **Estudo da Eficácia na Redução do Ruído de Tráfego em Pavimentos Drenantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Portugal, 2007.

SCHWANEN, W.; BLOKLAND, G.J.V.; LEEUWEN, H.M.V. **Comparison of Potential CPX Tyres**. M+P—consulting engineers. Projectname IPG 1.4 Robust CPX. Final Report, 2008.

SCHAUS, L. K. **Porous Asphalt Pavement Designs: Proactive Design for Cold Climate Use**. Tese de Doutorado. Universidade de Waterloo, Ontário. Canadá. 2007

SENGOZ, B.; TOPAL, A.; TANYEL, S. **Comparison of Pavement Surface Texture Determination by Sand Patch Test and 3d Laser Scanning**. Periodica Polytechnica. Civil Engineering. 2012.

SIMPSON, C.; MCLNTOSH, J.; BURET, M.; SAMUELS, S. **Asphalt Trials to Reduce Traffic Noise Levels**. 26 ARRB Conference, Research Driving Efficiency. Sydney. 2014.

SPECHT, L. P.; KOHLER, R.; POZZOBON, C. E.; CALLAI, S. C. **Causas, formas de medição e métodos para mitigação do ruído decorrente do tráfego de veículos**. Fortaleza, v.30, n.1, p.12-26, 2009.

SYGNA, K.; AASVANG, G. M.; AAMODT, G.; OFTEDAL, B.; KROG, N. H. **Road Traffic Noise, Sleep and Mental Health**. Environmental Research. 2014.

VOROBOVAS, V.; ANDRIEJAUSKAS, T.; JAGNIATINSKIS, A. **Laboratory Evaluation of Noise Reducing Asphalt Mixtures**. The 9th International Conference “Environmental Engineering”. Lituânia, 2014.

WAYSON, R. L. **Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise**. Transportation research board, 1998.

WEBER, M.; ODINK, J. **Assessing Impacts of Interventions: Acoustics And Perceptions of Low Noise Road Pavement**. Noise Control for Quality of Noise. InterNoise. 2013

WHO. **Night Noise Guidellines for Europe**. World Health Organization Europe. Dinamarca, 2009.

WHO. **Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe**. World Health Organization Regional Office for Europe. Copenhagen. Dinamarca, 2011.

ANEXO 1 – Cálculos para determinação do CPXI

Mistura Asfáltica Densa (BR-101 Contorno de Araranguá)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	71,5	80,3	85,1	88,9	92,8	89,7	90,8	86,3	84,9	81,4	77,3	74,6	72,2	97,9
M1 (Mic 01)	70,2	78,6	83,3	87,5	92,0	90,1	90,6	85,2	82,6	81,0	78,4	73,6	72,4	97,3
M2 (Mic 02)	70,9	79,5	84,3	88,3	92,4	89,9	90,7	85,8	83,9	81,2	77,9	74,1	72,3	97,6
Média														

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	69,8	79,1	81,7	86,9	92,6	89,6	90,8	84,7	83,0	82,2	76,4	72,8	71,7	97,3

Lcp _x =	97,3
--------------------	------

$$Lcp_{x_{t,w,r,i,f}} = L'cp_{x_{t,w,r,i,f}} - Cd_f$$

$$Lcp_{x_{t,w,r,i}} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{315}^{5000} 10^{0,1(Lcp_{x_{t,w,r,i,f}})} \right)$$

$$Lcp_{x_{t,w,r,i,f}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{2} \sum_{m=M1}^{M2} 10^{0,1(Lcp_{x_{t,w,r,i,f,m}})} \right)$$

$$Lcp_{x_{t,w,r,i}} = Lcp_{x_{t,w,r,i}} - B \cdot \lg \left(\frac{v_{t,w,r,i}}{V} \right) + CT_t \cdot (20 - T_i)$$

Lcp _x =	97,267
--------------------	--------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)	315																	
	71,3	79,6	82,7	87,9	93,2	89,5	1k	1,25k		1,6k	2k		2,5k	3,15k	4k	5k		Total
M1 (Mic 03)																		97,5
M2 (Mic 04)	70,2	77,0	80,1	86,2	91,7	90,6	90,6	88,0	85,4	83,3	81,8		81,8	78,9	74,7	72,5		96,7
Média	70,8	78,5	81,6	87,1	92,5	90,1	90,1	88,6	86,0	83,7	81,1		81,1	77,7	73,7	71,8		97,1

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	69,7	78,1	79,0	85,7	92,7	89,8	88,7	84,9	82,8	82,1	76,2	72,4	71,2	96,8

Lcpx =	96,8
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	96,77
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	70,1	74,6	79,4	85,9	92,4	90,4	92,3	89,5	85,7	82,5	78,2	74,3	71,7	98,2
	72,3	79,6	82,7	87,9	93,2	89,5	89,1	86,5	84,0	80,3	75,9	72,4	70,9	97,5
	71,3	77,8	81,4	87,0	92,8	90,0	91,0	88,3	84,9	81,5	77,2	73,5	71,3	97,8

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lepx, f	70,2	77,4	78,8	85,6	93,0	89,7	91,1	87,2	84,0	82,5	75,7	72,2	70,7	97,6

Lepx =	97,6
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22,0

Lepx =	97,53
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	72,5	76,8	80,8	86,2	91,7	90,7	88,9	85,9	83,8	82,5	78,9	75,1	72,3	97,0
M1 (Mic 03)	73,1	78,6	83,3	87,5	92,0	90,1	90,3	85,2	82,6	81,0	78,4	73,6	72,4	97,2
M2 (Mic 04)	72,8	77,8	82,2	86,9	91,9	90,4	89,7	85,6	83,2	81,8	78,7	74,4	72,4	97,1
Média														

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	71,7	77,4	79,6	85,5	92,1	90,1	89,8	84,5	82,3	82,8	77,2	73,1	71,8	96,8

Lcpx =	96,8
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referência =	80
Ti =	22

Lcpx =	96,771
--------	--------

$$Lcpx_{i,Y} = \frac{1}{n_r} \sum_{r=1}^{n_r} \left(\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{1}{2} \sum_{w=L_i,R} Lcpx_{t,w,r,i,Y} \right) \right)$$

n=1	Lcpx (L,R)	97,0
n=2	Lcpx (L,R)	97,1
	Lcpx srftt, 80	97,08

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)	315																
		400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k				Total
M1 (Mic 01)	72,3	75,6	82,1	89,4	93,8	89,4	92,0	88,5	86,1	83,2	78,9	76,1	73,3	98,7			98,7
M2 (Mic 02)	71,4	73,6	80,4	87,7	95,4	90,4	91,4	87,5	86,2	85,0	80,6	76,0	74,4	99,1			99,1
Média	71,9	74,7	81,3	88,6	94,7	89,9	91,7	88,0	86,2	84,2	79,8	76,1	73,9	98,9			98,9

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	70,8	74,3	78,7	87,2	94,9	89,6	91,8	86,9	85,3	85,2	78,3	74,8	73,3	98,7

Lcpx =	98,7
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	17

Lcpx =	98,80
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	71,3	74,6	79,8	87,8	92,1	89,4	91,9	88,3	85,5	82,5	77,8	73,9	71,6	97,8
M1 (Mic 03)														
M2 (Mic 04)	70,4	71,9	76,9	85,8	92,0	91,5	91,8	89,1	86,4	84,6	79,5	76,0	72,5	98,2
Média	70,9	73,5	78,6	86,9	92,1	90,6	91,9	88,7	86,0	83,7	78,7	75,1	72,1	98,0
Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	69,8	73,1	76,0	85,5	92,3	90,3	92,0	87,6	85,1	84,7	77,2	73,8	71,5	97,8
	Lcpx = 97,8													
	B = 30													
	CT = 0,03													
Velocidade méd =	80													
Vel. Referencia =	80													
	Ti = 17													
	Lcpx = 97,89													

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)	315																
		400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k				Total
M1 (Mic 01)	71,0	75,7	81,3	89,5	92,8	89,2	91,9	88,6	85,7	82,8	78,5	75,5	72,9				98,3
M2 (Mic 02)	72,4	74,1	79,1	88,0	94,5	89,7	91,6	87,2	85,7	84,3	80,6	75,2	74,0				98,6
Média	71,8	75,0	80,3	88,8	93,7	89,5	91,8	88,0	85,7	83,6	79,7	75,4	73,5				98,5

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6				Total
Lcpx, f	70,7	74,6	77,7	87,4	93,9	89,2	91,9	86,9	84,8	84,6	78,2	74,1	72,9				98,2

Lcpx =	98,2
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	17

Lcpx =	98,33
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315																
	71,2	74,6	79,3	86,9	92,1	89,1	92,4	88,8	85,4	82,4	77,9	73,4	71,4	73,2	71,4	71,4	Total
M1 (Mic 03)																	97,9
M2 (Mic 04)	69,8	72,6	76,4	85,5	92,3	91,1	92,8	89,7	86,1	84,6	80,3	76,2	73,2	73,2	73,2	73,2	98,5
Média	70,6	73,7	78,1	86,3	92,2	90,2	92,6	89,3	85,8	83,6	79,3	75,0	72,4	72,4	72,4	72,4	98,2

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
LcpX, f	69,5	73,3	75,5	84,9	92,4	89,9	92,7	88,2	84,9	84,6	77,8	73,7	71,8	98,0

LcpX =	98,0
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	17

n=1	LcpX (L,R)	98,3
n=2	LcpX (L,R)	98,2
	LcpX av, 80	98,28

$$LcpX_{i,V} = \frac{1}{n_r} \sum_{r=1}^{n_r} \left(\frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \left(\frac{1}{2} \sum_{w=L,R} LcpX_{i,w,r,i,V} \right) \right)$$

LcpX =	98,088
--------	--------

CPX	97,68
-----	-------

$$CPXI = 0,5L_p + 0,5L_H$$

	80 km/h	
Pneu SRTT	1	2
Mic 1	97,9	98,2
Mic 2	97,3	97,5
Mic 3	97,5	97,0
Mic 4	96,7	97,2

	80 km/h	
Pneu Avon	1	2
Mic 1	98,7	98,3
Mic 2	99,1	98,6
Mic 3	97,8	97,9
Mic 4	98,2	98,5

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	70,10	73,99	76,76	86,32	93,23	89,55	92,30	87,56	84,83	84,63	77,97	73,89	72,37
AVON n2	70,30	73,73	77,57	86,46	93,76	89,96	91,88	87,29	85,16	84,94	77,82	74,29	72,47
SRTT n1	69,74	78,64	80,55	86,33	92,67	89,70	89,87	84,79	82,88	82,16	76,27	72,62	71,45
SRTT n2	71,04	77,39	79,21	85,56	92,56	89,90	90,47	86,01	83,27	82,68	76,49	72,66	71,26
Lcpx, avon	70,20	73,86	77,18	86,39	93,50	89,76	92,10	87,43	85,00	84,79	77,90	74,09	72,42
Lcpx, srtt	70,44	78,06	79,93	85,96	92,61	89,80	90,18	85,44	83,08	82,43	76,38	72,64	71,36

Microrrevestimento BR-101 (Contorno de Araranguá)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	86,5	89,9	92,7	93,3	94,8	92,1	88,8	84,7	81,9	78,3	73,9	71,3	68,0	100,6
	84,9	86,4	90,6	94,3	96,6	94,7	89,2	83,7	80,9	78,2	74,2	69,9	67,4	101,3
	85,8	88,5	91,8	93,8	95,8	93,6	89,0	84,2	81,4	78,3	74,1	70,7	67,7	100,9

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	84,7	88,1	89,2	92,4	96,0	93,3	89,1	83,1	80,5	79,3	72,6	69,4	67,1	100,4

Lcpx =	100,4
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	75
Vel. Referencia =	80
Ti =	16

Lcpx =	101,32
--------	--------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)															
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k		
	M1 (Mic 03)	86,2	88,3	92,0	93,2	94,3	91,9	89,0	84,4	81,1	77,2	73,0	70,0	67,1	100,1
	M2 (Mic 04)	84,6	85,9	88,9	92,9	95,5	94,2	88,9	84,4	82,0	78,6	74,0	70,2	66,3	100,4
	Média	85,5	87,3	90,7	93,1	94,9	93,2	89,0	84,4	81,6	78,0	73,5	70,1	66,7	100,3

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	84,4	86,9	88,1	91,7	95,1	92,9	89,1	83,3	80,7	79,0	72,0	68,8	66,1	99,7

Lcpx =	99,7
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	75
Vel. Referencia =	80
Ti =	16

Lcpx =	100,66
--------	--------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)																			
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k						
	86,2	88,7	91,6	93,2	94,7	93,2	91,3	86,9	84,4	80,6	76,6	73,5	70,3	100,8					
	81,5	84,9	90,1	93,2	96,5	95,2	92,2	85,8	83,9	82,1	78,7	74,1	71,5	101,4					
Média	84,5	87,2	90,9	93,2	95,7	94,3	91,8	86,4	84,2	81,4	77,8	73,8	70,9	101,1					

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	83,4	86,8	88,3	91,8	95,9	94,0	91,9	85,3	83,3	82,4	76,3	72,5	70,3	100,7

Lcpx =	100,7
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	75
Vel. Referencia =	80
Ti =	16,0

Lcpx =	101,61
--------	--------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	82,5	85,7	89,8	93,2	94,7	92,0	91,8	87,1	84,8	80,9	76,3	72,9	70,8	100,3
M1 (Mic 03)														
M2 (Mic 04)	81,2	83,9	87,3	92,0	95,2	94,8	92,2	87,0	85,3	83,1	79,7	75,3	72,9	100,7
Média	81,9	84,9	88,7	92,6	95,0	93,6	92,0	87,1	85,1	82,1	78,3	74,3	72,0	100,5

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	80,8	84,5	86,1	91,2	95,2	93,3	92,1	86,0	84,2	83,1	76,8	73,0	71,4	100,1

Lcp _x =	100,1
--------------------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	75
Vel. Referencia =	80
Ti =	16

Lcp _x =	101,02
--------------------	--------

n=1	Lcp _x (L,R)	101,0
n=2	Lcp _x (L,R)	101,3
	Lcp _x sr _{tt} , 80	101,15

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)	315																		
	85,1	88,3	91,7	92,0	94,4	92,9	90,7	86,0	83,5	80,0	75,7	72,9	69,7	100,3	Total				
M1 (Mic 01)	85,1	88,3	91,7	92,0	94,4	92,9	90,7	86,0	83,5	80,0	75,7	72,9	69,7	100,3					
M2 (Mic 02)	84,3	85,4	89,8	93,2	96,1	95,0	91,3	85,0	83,4	81,1	77,7	73,4	70,9	101,1					
Média	84,7	87,1	90,9	92,6	95,3	94,1	91,0	85,5	83,5	80,6	76,8	73,2	70,3	100,7					

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	83,6	86,7	88,3	91,2	95,5	93,8	91,1	84,4	82,6	81,6	75,3	71,9	69,7	100,3

Lcpx =	100,3
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	75
Vel. Referência =	80
Ti =	11

Lcpx =	101,37
--------	--------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)	315																
	85,7	87,5	91,5	93,4	94,7	92,5	91,9	87,3	84,1	80,7	76,5	73,4	70,6	100,7	Total		
M1 (Mic 03)	84,1	84,9	88,5	92,9	96,0	95,6	91,8	87,1	85,7	82,9	79,3	75,6	72,2	101,3			
M2 (Mic 04)	85,0	86,4	90,3	93,2	95,4	94,3	91,9	87,2	85,0	81,9	78,1	74,6	71,5	101,0			
Média																	

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	83,9	86,0	87,7	91,8	95,6	94,0	92,0	86,1	84,1	82,9	76,6	73,3	70,9	100,6

Lcpx =	100,6
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	75
Vel. Referencia =	80
Ti =	11

Lcpx =	101,67
--------	--------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	86,6	89,0	92,9	94,1	95,0	92,0	90,3	85,5	82,5	78,6	74,3	71,7	68,5	100,9
	84,8	86,3	89,6	93,8	96,5	95,1	90,4	85,7	83,2	80,0	75,6	71,9	67,9	101,3
	85,8	87,9	91,6	94,0	95,8	93,8	90,4	85,6	82,9	79,4	75,0	71,8	68,2	101,1

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	84,7	87,5	89,0	92,6	96,0	93,5	90,5	84,5	82,0	80,4	73,5	70,5	67,6	100,6

Lcpx =	100,6
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade méd =	75
Vel. Referencia =	80
Ti =	11

Lcpx =	101,67
--------	--------

CPXI 101,4

n=1	Lcpx (L,R)	101,5
n=2	Lcpx (L,R)	101,6
	Lcpx av, 80	101,57

	80 km/h	
	1	2
Pneu SRTT		
Mic 1	100,6	100,8
Mic 2	101,3	101,4
Mic 3	100,1	100,3
Mic 4	100,4	100,7

	80 km/h	
	1	2
Pneu Avon		
Mic 1	100,3	100,7
Mic 2	101,1	101,3
Mic 3	100,7	100,9
Mic 4	101,3	101,3

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	84,47	87,46	88,90	92,53	96,00	93,62	90,16	83,97	81,56	80,07	73,29	70,06	67,56
AVON n2	83,75	86,35	87,96	91,51	95,57	93,90	91,55	85,34	83,38	82,31	76,02	72,66	70,34
SRTT n1	84,53	87,52	88,68	92,06	95,59	93,10	89,08	83,22	80,60	79,11	72,30	69,09	66,64
SRTT n2	82,26	85,80	87,36	91,53	95,54	93,68	91,99	85,63	83,73	82,79	76,56	72,74	70,89
Lcpx, avon	84,13	86,94	88,46	92,05	95,79	93,76	90,91	84,71	82,56	81,33	74,86	71,55	69,17
Lcpx, srtt	83,54	86,75	88,07	91,80	95,56	93,40	90,77	84,59	82,44	81,33	74,93	71,29	69,27

Asfalto-Borracha (Beira-Mar)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	77,2	79,0	80,9	86,3	94,3		90,4	89,8	89,3	86,8	82,9	78,7	77,6	75,1	98,5
M1 (Mic 01)															
M2 (Mic 02)	77,0	78,1	80,5	83,6	94,3		92,3	90,3	88,3	83,7	82,7	78,9	77,2	77,4	98,6
Média	77,1	78,6	80,7	85,2	94,3		91,5	90,1	88,8	85,5	82,8	78,8	77,4	76,4	98,5

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	76,0	78,2	78,1	83,8	94,5	91,2	90,2	87,7	84,6	83,8	77,3	76,1	75,8	98,3

Lcpx =	98,3
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	98,28
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)																	
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total			
	M1 (Mic 01)	76,1	79,7	82,9	87,1	93,1	90,2	89,9	89,0	84,5	79,9	78,7	75,6	98,6			
	M2 (Mic 02)	73,7	77,4	80,4	83,8	93,2	90,7	89,2	86,9	85,2	82,1	80,2	79,4	98,3			
Média	75,1	78,7	81,8	85,8	93,2	90,5	90,4	89,6	88,1	84,9	81,1	79,5	77,9	98,5			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total			
Lcpx, f	74,0	78,3	79,2	84,4	93,4	90,2	90,5	88,5	87,2	85,9	79,6	78,2	77,3	98,2			

Lcpx =	98,2
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	98,13
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)																	
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total			
M1 (Mic 03)																	
M2 (Mic 04)	70,0	72,9	75,6	81,0	90,1	89,4	91,2	88,5	86,1	85,8	83,6	79,3	79,5	97,2			
Média	70,0	72,9	75,6	81,0	90,1	89,4	91,2	88,5	86,1	85,8	83,6	79,3	79,5	97,2			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	68,9	72,5	73,0	79,6	90,3	89,1	91,3	87,4	85,2	86,8	82,1	78,0	78,9	97,0

Lcp _x =	97,0
--------------------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcp _x =	96,96
--------------------	-------

n=1	Lcp _x (L,R)	97,7
n=2	Lcp _x (L,R)	97,5
	Lcp _x sr _{tt} , 80	97,64

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)	31,5	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	71,2	74,2	80,6	89,8	96,3	90,2	91,2	87,7	84,8	84,3	81,4	77,7	76,1	99,6
	71,3	73,2	81,4	89,5	92,9	87,6	89,5	87,3	82,8	80,9	76,5	73,0	71,5	97,3
	71,3	73,7	81,0	89,7	94,9	89,1	90,4	87,5	83,9	82,9	79,6	76,0	74,4	98,6

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	70,2	73,3	78,4	88,3	95,1	88,8	90,5	86,4	83,0	83,9	78,1	74,7	73,8	98,4

Lcpx =	98,4
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,25
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)																		
	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k				
	72,1	76,5	82,2	87,6	92,9		90,9	91,6	87,7	83,1	80,6	76,7	72,9	71,9	98,1			
	72,0	75,8	76,4	84,8	92,8		90,5	91,5	88,8	84,4	84,4	79,9	74,8	72,2	98,0			
Média	72,1	76,2	80,2	86,4	92,9		90,7	91,6	88,3	83,8	82,9	78,6	74,0	72,1	98,0			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lepx, f	71,0	75,8	77,6	85,0	93,1	90,4	91,7	87,2	82,9	83,9	77,1	72,7	71,5	97,8

Lepx =	97,8
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lepx =	97,67
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)																	
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total			
	M1 (Mic 01)	72,5	76,8	80,0	87,3	95,3	92,6	87,0	84,2	82,4	79,1	74,7	72,8	99,1			
	M2 (Mic 02)	73,4	77,7	82,9	88,3	93,3	90,6	85,9	81,5	79,5	75,4	71,8	70,8	97,8			
Média	73,0	77,3	81,7	87,8	94,4	91,7	90,5	86,5	83,1	81,2	77,6	73,5	71,9	98,5			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total		
Lcpx, f	71,9	76,9	79,1	86,4	94,6	91,4	90,6	85,4	82,2	82,2	76,1	72,2	71,3	98,3		

Lcpx =	98,3
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,14
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800												
M1 (Mic 03)	70,1	74,3	79,7	85,3	94,7	91,9	90,3	88,6	82,7	80,8	77,2	72,3	71,6	98,5	Total		
M2 (Mic 04)	69,8	70,0	73,5	83,5	94,1	90,4	90,0	89,5	84,2	84,7	80,3	74,2	70,9	98,1			
Média	70,0	72,7	77,6	84,5	94,4	91,2	90,2	89,1	83,5	83,2	79,0	73,4	71,3	98,4			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	68,9	72,3	75,0	83,1	94,6	90,9	90,3	88,0	82,6	84,2	77,5	72,1	70,7	98,2

LcpX =	98,2
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

n=1	Lcp _x (L,R)	98,0
n=2	Lcp _x (L,R)	98,1
Lcp_x av, 80		98,03

Lcp _x =	98,05
--------------------	-------

CPXI	97,83
------	-------

	80 km/h	
Pneu Avon	1	2
Mic 1	99,6	99,1
Mic 2	97,3	97,8
Mic 3	98,1	98,5
Mic 4	98,0	98,1

	80 km/h	
Pneu SRTT	1	2
Mic 1	98,5	98,6
Mic 2	98,6	98,3
Mic 3	-	-
Mic 4	97,5	97,2

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	70,62	75,15	77,51	85,07	94,61	91,17	90,41	86,87	82,39	83,29	76,88	72,12	71,00
AVON n2	70,57	74,71	78,03	86,93	94,21	89,67	91,13	86,81	82,96	83,91	77,63	73,77	72,77
SRTT n1	73,63	76,18	76,49	82,49	93,19	90,93	90,71	87,38	84,37	84,91	78,23	76,47	76,22
SRTT n2	72,13	76,30	77,15	82,60	92,09	89,66	90,92	87,96	86,30	86,36	81,04	78,11	78,17
Lcpx, avon	70,59	74,94	77,78	86,10	94,42	90,49	90,78	86,84	82,68	83,61	77,27	73,02	71,98
Lcpx, srtt	72,94	76,24	76,83	82,55	92,67	90,34	90,82	87,68	85,44	85,70	79,86	77,36	77,31

Mistura asfáltica densa (Av. Beira-Mar, UFSC Lado Esquerdo)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315																	
	81,6	85,1	88,3	91,1	97,4	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total			
M1 (Mic 01)																		
M2 (Mic 02)	79,8	82,6	84,7	87,7	96,5		94,3	89,2	86,7	84,2	83,1	78,7	75,9	74,1	100,1			
Média	80,8	84,0	86,9	89,7	97,0		93,3	89,2	87,4	85,3	82,7	78,4	75,9	73,4	100,4			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	79,7	83,6	84,3	88,3	97,2	93,0	89,3	86,3	84,4	83,7	76,9	74,6	72,8	100,2

Lcpx =	100,2
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	100,10
--------	--------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)	315																		
																			Total
M1 (Mic 03)																			
M2 (Mic 04)	78,4	82,7	86,0	88,8	97,1	95,8	89,4	84,1	82,7	80,1	75,2	72,3	70,9	100,7					
Média																			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	77,3	82,3	83,4	87,4	97,3	95,5	89,5	83,0	81,8	81,1	73,7	71,0	70,3	100,5

Lcp _x =	100,5
--------------------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referência =	80
Ti =	22

Lcp _x =	100,48
--------------------	--------

n=1	Lcp _x (L,R)	100,22
n=2	Lcp _x (L,R)	100,31
	Lcp _x sr _{tt} , 80	100,27

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)	315																
		400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total			
M1 (Mic 01)	79,8	81,5	84,7	89,6	96,8	95,9	91,8	85,6	82,8	79,4	77,2	73,2	71,2	100,9			
M2 (Mic 02)	79,6	82,9	86,9	90,5	95,9	95,2	91,2	83,6	81,3	78,3	75,0	71,9	70,5	100,4			
Média	79,7	82,3	85,9	90,1	96,4	95,6	91,5	84,7	82,1	78,9	76,2	72,6	70,9	100,7			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	78,6	81,9	83,3	88,7	96,6	95,3	91,6	83,6	81,2	79,9	74,7	71,3	70,3	100,4

Lcpx =	100,4
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	100,43
--------	--------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	80,1	83,6	87,9	90,8	96,9	96,6	86,8	84,5	81,6	78,7	76,2	71,2	70,5	101,0
	78,4	80,2	87,6	89,8	96,7	95,8	85,3	85,4	82,3	80,9	78,0	73,2	70,4	100,5
	79,3	82,2	87,8	90,3	96,8	96,2	86,1	85,0	82,0	79,9	77,2	72,3	70,5	100,8

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	78,2	81,8	85,2	88,9	97,0	95,9	86,2	83,9	81,1	80,9	75,7	71,0	69,9	100,5

Lcpx =	100,5
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	100,50
--------	--------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	77,8	81,3	85,4	89,5	96,9		95,8	88,0	87,7	83,5	80,3	78,0	74,2	71,8	100,7
M1 (Mic 01)															
M2 (Mic 02)	78,8	82,1	86,7	89,4	96,3		95,9	91,3	83,8	81,8	78,4	75,8	72,7	71,5	100,6
Média	78,3	81,7	86,1	89,5	96,6		95,9	90,0	86,2	82,7	79,5	77,0	73,5	71,7	100,7

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	77,2	81,3	83,5	88,1	96,8	95,6	90,1	85,1	81,8	80,5	75,5	72,2	71,1	100,5

Lcpx =	100,5
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	100,45
--------	--------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315																
	400	500	630	800	1k	1,25k											
	83,4	87,5	90,2	97,4	94,9	90,7	84,9	82,0	79,1	76,7	71,8	71,1	100,9				
	80,7																
M1 (Mic 03)																	
M2 (Mic 04)																	
	80,0	87,5	90,2	97,4	94,9	89,7	84,9	82,0	79,1	76,7	71,8	71,1	100,8				
Média																	
	80,4	87,5	90,2	97,4	94,9	90,2	84,9	82,0	79,1	76,7	71,8	71,1	100,9				

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	79,3	83,0	84,9	88,8	97,6	94,6	90,3	83,8	81,1	80,1	75,2	70,5	70,5	100,6

Lcpx =	100,6
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

n=1	Lcpx (L,R)	100,5
n=2	Lcpx (L,R)	100,5
	Lcpx av, 80	100,51

Lcpx =	100,64
--------	--------

CPXI	100,39
------	--------

	80 km/h	
	1	2
Pneu SRTT		
Mic 1	100,7	100,3
Mic 2	100,1	100,5
Mic 3	-	-
Mic 4	100,5	100,7

	80 km/h	
	1	2
Pneu Avon		
Mic 1	100,9	100,7
Mic 2	100,4	100,6
Mic 3	101,0	100,9
Mic 4	100,5	100,8

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	78,4	82,2	84,3	88,4	97,2	95,1	90,2	84,5	81,5	80,3	75,4	71,4	70,8
AVON n2	78,4	81,8	84,3	88,8	96,8	95,6	89,7	83,7	81,1	80,4	75,2	71,2	70,1
SRTT n1	77,7	81,6	82,2	86,6	97,0	94,5	90,3	85,6	83,5	83,5	76,9	73,8	72,9
SRTT n2	78,7	82,7	83,4	86,9	97,3	94,8	89,9	83,6	81,4	81,5	74,8	71,5	70,6
Lcpx, avon	78,4	82,0	84,3	88,6	97,0	95,4	90,0	84,1	81,3	80,4	75,3	71,3	70,4
Lcpx, srtt	78,3	82,2	82,8	86,8	97,2	94,7	90,1	84,7	82,6	82,6	76,0	72,8	71,9

Mistura asfáltica densa (Av. Beira-Mar, UFSC Lado Direito)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)																			
	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k					
	M1 (Mic 01)	81,2	85,3	87,8	91,2	97,9	92,9	91,2	88,8	87,9	83,3	79,0	77,1	73,6	101,3				
	M2 (Mic 02)	79,1	82,1	85,6	86,9	95,6	94,5	91,4	87,3	82,8	81,6	77,5	73,8	72,2	100,0				
Média	80,3	84,0	86,8	89,6	96,9	93,8	91,3	88,1	86,1	82,5	78,3	75,8	73,0	100,7					

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	79,2	83,6	84,2	88,2	97,1	93,5	91,4	87,0	85,2	83,5	76,8	74,5	72,4	100,5

Lcpx =	100,5
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	100,40
--------	--------

[illegible]

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	78,1	81,7	82,3	85,6	95,0	95,1	91,7	86,4	83,8	84,6	77,0	73,5	72,7	99,9

LcpX =	99,9
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

$L_{cpx} =$	99,80
-------------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)																	
	315	400	500	630	800				1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	M1 (Mic 01)	82,1	85,6	89,7	91,8	97,8			92,3	89,5	87,5	86,4	81,7	77,8	76,1	71,9	101,1
	M2 (Mic 02)	80,0	84,0	86,8	87,6	95,5			94,2	89,7	85,8	81,5	80,7	77,0	73,2	71,2	99,7
Média	81,2	84,9	88,5	90,2	96,8				93,4	89,6	86,7	84,6	81,2	77,4	74,9	71,6	100,4

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2				-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	80,1	84,5	85,9	88,8	97,0				93,1	89,7	85,6	83,7	82,2	75,9	73,6	71,0	100,1

Lcpx =	100,1
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22,0

Lcpx =	100,08
--------	--------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)																			
	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k				Total	
M1 (Mic 03)																			
M2 (Mic 04)	79,3	83,9	86,7	89,0	96,0		96,1	89,8	85,6	83,6	82,4	77,6	74,7	72,3				100,6	
Média																			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	78,2	83,5	84,1	87,6	96,2	95,8	89,9	84,5	82,7	83,4	76,1	73,4	71,7	100,3

Lcpx =	100,3
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	100,29
--------	--------

n=1	Lcpx (L,R)	100,1
n=2	Lcpx (L,R)	100,2
	Lcpx srft, 80	100,14

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)																			
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k						
	M1 (Mic 01)	80,0	84,0	87,4	91,2	95,8	94,2	86,0	85,9	79,9	77,2	73,2	71,0	100,1					
	M2 (Mic 02)	79,5	83,3	86,7	89,7	94,9	94,9	85,9	84,7	78,3	75,1	72,4	71,2	99,8					
Média	79,8	83,7	87,1	90,5	95,4	94,6	88,3	86,0	85,3	79,2	76,3	72,8	71,1	99,9					

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	78,7	83,3	84,5	89,1	95,6	94,3	88,4	84,9	84,4	80,2	74,8	71,5	70,5	99,6

Lcpx =	99,6
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	99,59
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)	315																		
	80,0	83,6	88,0	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k			Total	
M1 (Mic 03)																			
M2 (Mic 04)	79,2	82,2	88,0	90,4	90,4	95,8		92,9	90,9	86,1	83,0	82,2	78,3	76,6	75,5			99,9	
Média	79,6	83,0	88,0	90,6	90,6	95,6		93,9	90,9	85,5	82,4	80,9	77,5	74,8	73,8			100,1	

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	78,5	82,6	85,4	89,2	95,8	93,6	91,0	84,4	81,5	81,9	76,0	73,5	73,2	99,7

Lcpx =	99,7
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	99,74
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)																	
	315	400	500	630	800		1k		1,25k		1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	M1 (Mic 01)	79,0	82,5	85,4	88,4	95,4	95,1		92,0		86,4	83,7	81,0	78,0	74,0	72,1	100,2
	M2 (Mic 02)	78,0	82,8	86,0	89,3	95,7	95,7		90,8		84,8	82,3	79,0	75,8	73,1	72,1	100,3
Média	78,5	82,7	85,7	88,9	95,6		95,4		91,4		85,7	83,1	80,1	77,0	73,6	72,1	100,3

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2		-0,3		0,1		-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	77,4	82,3	83,1	87,5	95,8		95,1		91,5		84,6	82,2	81,1	75,5	72,3	71,5	100,0

Lcpx =	100,0
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	100,03
--------	--------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800												
	80,3	83,6	88,6	90,5	95,9	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total			
M1 (Mic 03)																	
M2 (Mic 04)	79,2	83,2	87,9	91,2	95,3	93,9	91,7	85,4	84,6	82,0	76,9	71,3	69,3	100,2			
Média	79,8	83,4	88,3	90,9	95,6	94,8	91,0	85,8	85,3	80,9	77,1	71,8	70,7	100,4			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	78,7	83,0	85,7	89,5	95,8	94,5	91,1	84,7	84,4	81,9	75,6	70,5	70,1	100,1

Lcp _x =	100,1
--------------------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

n=1	Lcp _x (L,R)	99,7
n=2	Lcp _x (L,R)	100,1
	Lcp _x av, 80	99,86

Lcp _x =	100,09
--------------------	--------

CPXI	100,00
------	--------

	80 km/h	
Pneu SRTT	1	2
Mic 1	101,3	101,1
Mic 2	100	99,7
Mic 3	-	-
Mic 4	100,1	100,6

	80 km/h	
Pneu Avon	1	2
Mic 1	100,1	100,2
Mic 2	99,8	100,3
Mic 3	100,2	100,7
Mic 4	99,9	100,2

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	78,10	82,64	84,57	88,58	95,78	94,80	91,33	84,62	83,42	81,52	75,55	71,47	70,87
AVON n2	78,59	82,92	84,96	89,13	95,69	93,94	89,86	84,63	83,23	81,11	75,40	72,61	72,08
SRTT n1	78,67	82,75	83,38	87,07	96,18	94,36	91,55	86,72	84,53	84,10	76,91	74,00	72,53
SRTT n2	79,24	84,01	85,09	88,24	96,62	94,64	89,80	85,10	83,23	82,85	76,01	73,49	71,35
LcpX, avon	78,35	82,79	84,77	88,87	95,74	94,39	90,66	84,62	83,33	81,32	75,48	72,08	71,52
LcpX, srtt	78,96	83,43	84,31	87,69	96,40	94,50	90,77	85,99	83,93	83,52	76,48	73,76	71,98

Mistura asfáltica densa (BR-101, KM 257-sul)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	75,6	80,7	87,0	90,6	94,1	90,6	91,5	88,6	83,4	81,6	78,1	74,1	73,8	99,1
M1 (Mic 01)	75,6	80,7	87,0	90,6	94,1	90,6	91,5	88,6	83,4	81,6	78,1	74,1	73,8	99,1
M2 (Mic 02)	74,8	79,6	84,4	88,7	94,5	93,9	93,1	88,3	85,8	83,8	80,8	76,0	73,9	100,0
Média	75,2	80,2	85,9	89,8	94,3	92,6	92,4	88,5	84,8	82,8	79,7	75,2	73,9	99,6

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	74,1	79,8	83,3	88,4	94,5	92,3	92,5	87,4	83,9	83,8	78,2	73,9	73,3	99,3

Lcpx =	99,3
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,47
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)	315																		
		400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k						
M1 (Mic 03)	76,5	80,7	85,9	90,3	94,8	91,7	91,3	89,3	83,6	81,7	78,8	74,1	73,6	99,5					
M2 (Mic 04)	74,2	78,1	82,1	88,2	93,4	93,8	92,0	89,3	87,8	85,3	79,5	76,5	74,5	99,6					
Média	75,5	79,6	84,4	89,4	94,2	92,9	91,7	89,3	86,2	83,9	79,2	75,5	74,1	99,5					

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	74,4	79,2	81,8	88,0	94,4	92,6	91,8	88,2	85,3	84,9	77,7	74,2	73,5	99,2

Lcpx =	99,2
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referência =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,43
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)	315																
M1 (Mic 01)	74,2	78,9	83,9	90,1	94,3	90,4	91,9	89,3	84,3	82,1	78,7	74,4	74,0	99,1	Total		
M2 (Mic 02)	73,5	77,6	81,4	88,7	95,2	93,9	93,6	89,1	87,3	85,2	82,5	77,6	75,6	100,4			
Média	73,9	78,3	82,8	89,5	94,8	92,5	92,8	89,2	86,1	83,9	81,0	76,3	74,9	99,8			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	72,8	77,9	80,2	88,1	95,0	92,2	92,9	88,1	85,2	84,9	79,5	75,0	74,3	99,6

Lcpx =	99,6
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	25,0

Lcpx =	98,77
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	74,2	78,0	83,3	88,6	95,3	90,6	91,1	88,6	83,8	81,2	78,2	73,8	73,6	99,1
M1 (Mic 03)														
M2 (Mic 04)	72,1	75,1	78,2	86,5	94,8	93,1	91,6	88,4	87,4	85,2	80,2	77,0	74,7	99,5
Média	73,3	76,8	81,5	87,7	95,1	92,0	91,4	88,5	86,0	83,6	79,3	75,7	74,2	99,3

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	72,2	76,4	78,9	86,3	95,3	91,7	91,5	87,4	85,1	84,6	77,8	74,4	73,6	99,1

Lcpx =	99,1
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,29
--------	-------

n=1	Lcpx (L,R)	98,4
n=2	Lcpx (L,R)	98,5
	Lcpx srftt, 80	98,49

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)																	
	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k			
	79,7	83,7	86,7	90,3	96,3		92,7	91,1	89,7	87,4	83,8	79,3	76,6	74,7			Total
	M1 (Mic 01)																100,5
M2 (Mic 02)	76,6	83,1	84,3	86,7	96,1		95,9	93,7	90,6	87,7	86,1	81,6	78,4	77,3			101,4
Média	78,4	83,4	85,7	88,9	96,2		94,6	92,6	90,2	87,6	85,1	80,6	77,6	76,2			100,9

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	77,3	83,0	83,1	87,5	96,4	94,3	92,7	89,1	86,7	86,1	79,1	76,3	75,6	100,7

Lcpx =	100,7
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	100,01
--------	--------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	75,6	81,4	83,6	87,2	96,1	93,9	91,5	89,6	87,4	84,2	78,4	75,6	74,5	100,3
M1 (Mic 03)	75,6	81,4	83,6	87,2	96,1	93,9	91,5	89,6	87,4	84,2	78,4	75,6	74,5	100,3
M2 (Mic 04)	74,5	80,4	81,1	85,0	95,1	96,5	92,0	89,7	88,1	86,4	81,8	79,6	77,2	100,9
Média	75,1	80,9	82,5	86,2	95,6	95,4	91,8	89,7	87,8	85,4	80,4	78,0	76,1	100,6

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	74,0	80,5	79,9	84,8	95,8	95,1	91,9	88,6	86,9	86,4	78,9	76,7	75,5	100,4

Lcpx =	100,4
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	99,69
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800												
	79,5	85,0	86,1	88,6	95,5	91,4	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k				Total
M1 (Mic 01)							92,7	90,9	88,5	84,6	79,9	77,4	75,1				100,3
M2 (Mic 02)	76,5	83,9	82,7	86,5	96,2	95,1	92,6	90,7	88,2	85,6	80,8	77,2	75,5				101,0
Média	78,3	84,5	84,7	87,7	95,9	93,6	92,7	90,8	88,4	85,1	80,4	77,3	75,3				100,7

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6				Total
Lcpx, f	77,2	84,1	82,1	86,3	96,1	93,3	92,8	89,7	87,5	86,1	78,9	76,0	74,7				100,4

Lcpx =	100,4
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	99,73
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315																
	78,4	83,4	400	500	630	800		1k		1,25k		1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
M1 (Mic 03)				84,6	87,0	96,1		90,9		91,0		90,5	88,4	84,5	78,0	75,5	72,7
M2 (Mic 04)	76,5	81,4	82,0	86,0	86,0	95,2		94,4		90,8		91,0	89,4	85,8	82,8	81,0	78,4
Média	77,6	82,5	83,5	86,5	86,5	95,7		93,0		90,9		90,8	88,9	85,2	81,0	79,1	76,4
																	Total

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	76,5	82,1	80,9	85,1	95,9	92,7	91,0	89,7	88,0	86,2	79,5	77,8	75,8	99,9

Lcpx =	99,9
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referência =	80
Ti =	22

n=1	Lcpx (L,R)	99,9
n=2	Lcpx (L,R)	99,5
	Lcpx av, 80	99,66

Lcpx =	99,219
--------	--------

CPXI	99,07
------	-------

	80 km/h	
Pneu SRTT	1	2
Mic 1	99,1	99,1
Mic 2	100,0	100,4
Mic 3	99,5	99,1
Mic 4	99,6	99,5

	80 km/h	
Pneu Avon	1	2
Mic 1	100,4	100,3
Mic 2	101,4	101,0
Mic 3	100,3	99,9
Mic 4	100,9	100,4

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	76,82	83,21	81,55	85,74	95,97	93,02	91,96	89,68	87,75	86,16	79,22	76,97	75,30
AVON n2	75,97	81,94	81,77	86,35	96,12	94,71	92,29	88,82	86,76	86,27	79,01	76,52	75,52
SRTT n1	74,26	79,50	82,61	88,17	94,43	92,42	92,13	87,80	84,63	84,38	77,92	74,01	73,36
SRTT n2	72,48	77,21	79,60	87,26	95,12	91,97	92,26	87,77	85,11	84,79	78,74	74,70	73,94
LcpX, avon	76,41	82,62	81,66	86,05	96,05	93,95	92,13	89,27	87,28	86,22	79,12	76,76	75,41
LcpX, srtt	73,46	78,50	81,36	87,74	94,79	92,20	92,20	87,78	84,88	84,59	78,35	74,37	73,66

Mistura asfáltica do tipo gap graded (Criciúma)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)																
	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k		Total
M1 (Mic 01)	70,0	77,4	80,5	85,7	94,1		90,0	89,1	89,3	88,5	84,4	79,4	78,0	73,4		98,4
M2 (Mic 02)	71,2	76,5	77,9	80,7	93,0		90,9	88,5	88,9	86,9	83,3	78,7	78,0	74,5		97,6
Média	70,6	77,0	79,4	83,9	93,6		90,5	88,8	89,1	87,8	83,9	79,1	78,0	74,0		98,0

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	69,5	76,6	76,8	82,5	93,8	90,2	88,9	88,0	86,9	84,9	77,6	76,7	73,4	97,8

Lcpx =	97,8
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referência =	80
Ti =	22

Lcpx =	97,75
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)																	
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k				
	73,0	76,2	79,5	85,8	96,3	92,0	89,5	89,5	88,8	85,5	79,1	77,8	73,5	99,8			
	72,1	75,5	77,5	80,3	94,6	92,6	89,1	88,9	88,1	85,1	82,3	79,5	74,1	98,9			
Media	72,6	75,9	78,6	83,9	95,5	92,3	89,3	89,2	88,5	85,3	81,0	78,7	73,8	99,3			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	71,5	75,5	76,0	82,5	95,7	92,0	89,4	88,1	87,6	86,3	79,5	77,4	73,2	99,2

Lcpx =	99,2
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	99,12
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800												
	71,2	77,9	80,5	85,2	94,2	90,4	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total		
M1 (Mic 01)								88,7	88,6	88,0	84,8	79,6	78,0	73,7	98,3		
M2 (Mic 02)	69,5	75,8	78,0	80,5	93,4	91,8		89,0	88,6	86,7	83,5	78,4	77,7	74,7	98,0		
Média	70,4	77,0	79,4	83,5	93,8	91,2		88,9	88,6	87,4	84,2	79,0	77,9	74,2	98,2		

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	69,3	76,6	76,8	82,1	94,0	90,9	89,0	87,5	86,5	85,2	77,5	76,6	73,6	98,0

Lcp _x =	98,0
--------------------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22,0

Lcp _x =	97,90
--------------------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)																			
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k						
	71,0	76,7	80,6	84,8	96,4	92,4	89,6	91,0	90,1	86,6	79,9	78,7	74,0	100,2					
	70,2	76,3	77,9	80,6	94,0	93,1	90,1	90,2	89,1	85,8	82,9	79,5	74,3	99,2					
	70,6	76,5	79,5	83,2	95,4	92,8	89,9	90,6	89,6	86,2	81,7	79,1	74,2	99,7					
Média																			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	69,5	76,1	76,9	81,8	95,6	92,5	90,0	89,5	88,7	87,2	80,2	77,8	73,6	99,5

Lcpx =	99,5
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	99,46
--------	-------

n=1	Lcpx (L,R)	98,4
n=2	Lcpx (L,R)	98,7
	Lcpx srfft, 80	98,56

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)																	
	315	400	500														
	69,2	75,2	81,4	89,4	94,9	89,2	89,4	86,0	82,7	79,7	76,1	73,0	71,0	98,2			
	68,3	72,9	79,0	86,0	94,8	89,7	87,8	84,3	83,8	81,6	76,6	73,6	71,0	97,6			
Média	68,8	74,2	80,4	88,0	94,9	89,5	88,7	85,2	83,3	80,8	76,4	73,3	71,0	97,9			

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	67,7	73,8	77,8	86,6	95,1	89,2	88,8	84,1	82,4	81,8	74,9	72,0	70,4	97,8

Lcpx =	97,8
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	97,70
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)																	
	315	400	500	630	800			1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k		
	68,2	72,9	76,9	84,7	89,6			89,1	93,3	89,4	85,7	83,9	79,8	76,6	74,1		Total
	67,9	72,9	78,0	84,7	90,1			89,7	92,3	88,3	85,1	82,6	78,7	74,6	71,9		97,3
Média	68,1	72,9	77,5	84,7	89,9			89,4	92,8	88,9	85,4	83,3	79,3	75,7	73,1		97,5

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2		-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	67,0	72,5	74,9	83,3	90,1		89,1	92,9	87,8	84,5	84,3	77,8	74,4	72,5	97,3

Lcpx =	97,3
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	97,20
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	68,2	74,2	80,9	88,8	94,8	88,8	88,7	85,5	82,3	79,6	75,6	73,1	70,7	97,9
M1 (Mic 01)														
M2 (Mic 02)	67,1	72,0	78,3	85,9	94,7	89,3	87,0	83,9	83,5	81,6	76,7	73,8	70,7	97,4
Média	67,7	73,2	79,8	87,6	94,8	89,1	87,9	84,8	82,9	80,7	76,2	73,5	70,7	97,6

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	66,6	72,8	77,2	86,2	95,0	88,8	88,0	83,7	82,0	81,7	74,7	72,2	70,1	97,5

Lcpx =	97,5
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	97,42
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	69,3	75,2	81,5	86,0	90,5	88,4	92,4	87,4	85,1	81,2	76,4	73,9	72,0	97,2
M1 (Mic 03)														
M2 (Mic 04)	66,8	72,9	76,8	83,6	89,9	89,5	92,1	87,1	84,5	82,0	78,0	73,9	70,5	96,9
Média	68,2	74,2	79,8	85,0	90,2	89,0	92,3	87,3	84,8	81,6	77,3	73,9	71,3	97,0

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	67,1	73,8	77,2	83,6	90,4	88,7	92,4	86,2	83,9	82,6	75,8	72,6	70,7	96,8

Lcp _x =	96,8
--------------------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referência =	80
Ti =	22

n=1	Lcp _x (L,R)	97,4
n=2	Lcp _x (L,R)	97,1
	Lcp _x sr _{tt} , 80	97,26

Lcp _x =	96,73
--------------------	-------

CPXI	97,91
------	-------

	80 km/h	
	1	2
Pneu SRTT		
Mic 1	98,4	98,3
Mic 2	97,6	98,0
Mic 3	99,8	100,2
Mic 4	98,9	99,2

	80 km/h	
	1	2
Pneu Avon		
Mic 1	98,2	97,9
Mic 2	97,6	97,4
Mic 3	97,7	97,2
Mic 4	97,3	96,9

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	66,9	73,3	77,2	85,1	93,2	88,7	90,7	85,1	83,1	82,2	75,3	72,4	70,4
AVON n2	67,3	73,2	76,6	85,3	93,2	89,1	91,3	86,3	83,6	83,2	76,6	73,4	71,6
SRTT n1	70,6	76,1	76,4	82,5	94,9	91,2	89,2	88,1	87,2	85,7	78,6	77,1	73,3
SRTT n2	69,4	76,3	76,8	81,9	94,9	91,7	89,5	88,6	87,8	86,3	79,0	77,2	73,6
Lcpx, avon	67,1	73,3	76,9	85,2	93,2	88,9	91,0	85,8	83,3	82,7	76,0	72,9	71,0
Lcpx, srtt	70,1	76,2	76,6	82,2	94,9	91,5	89,3	88,4	87,5	86,0	78,8	77,2	73,4

Mistura asfáltica densa com borracha (SC 403 - Florianópolis)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	76,2	80,7	81,9	86,6	93,1		90,8	90,5	89,7	87,8	84,9	80,4	78,3	75,6	98,6
	74,4	78,7	80,8	83,6	92,6		91,8	90,0	89,0	83,3	85,9	81,4	76,5	75,7	98,1
	75,4	79,8	81,4	85,4	92,9		91,3	90,3	89,4	86,1	85,4	80,9	77,5	75,7	98,3
Média															

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	74,3	79,4	78,8	84,0	93,1	91,0	90,4	88,3	85,2	86,4	79,4	76,2	75,1	98,1

Lcpx =	98,1
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	98,01
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
M1 (Mic 03)														
M2 (Mic 04)	72,5	75,1	77,4	83,8	91,3	90,5	90,9	87,3	84,1	84,4	80,0	75,8	77,0	97,2
Média														

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	71,4	74,7	74,8	82,4	91,5	90,2	91,0	86,2	83,2	85,4	78,5	74,5	76,4	97,1

Lcpx =	97,1
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	97,00
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800			1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	77,0	81,7	84,4	87,8	93,7			90,7	90,4	89,3	87,3	84,2	80,2	77,7	74,6	98,8
	76,4	80,2	82,8	85,3	93,5			91,8	90,9	89,0	83,6	85,1	80,9	76,2	75,2	98,6
	76,7	81,0	83,7	86,7	93,6			91,3	90,7	89,2	85,8	84,7	80,6	77,0	74,9	98,7

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2			-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	75,6	80,6	81,1	85,3	93,8			91,0	90,8	88,1	84,9	85,7	79,1	75,7	74,3	98,4

Lcpx =	98,4
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med	80
=	
Vel. Referencia =	80
Ti =	22,0

Lcpx =	98,35
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
M1 (Mic 03)														
M2 (Mic 04)	70,0	74,4	77,3	83,2	90,3	90,5	91,1	87,7	84,4	84,3	80,2	76,5	75,9	97,1
Média														

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	68,9	74,0	74,7	81,8	90,5	90,2	91,2	86,6	83,5	85,3	78,7	75,2	75,3	96,9

Lcpx =	96,9
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	96,81
--------	-------

n=1	Lcpx (L,R)	97,5
n=2	Lcpx (L,R)	97,6
	Lcpx srftt, 80	97,54

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)	315																
	M1 (Mic 01)	72,5	75,9	79,8	88,1	94,9	92,8	90,4	86,2	82,5	80,6	77,1	72,8	69,5	98,9		
	M2 (Mic 02)	74,6	78,9	84,4	89,2	91,1	89,5	89,7	85,1	81,6	79,1	75,0	72,6	70,9	96,9		
	Média	73,7	77,7	82,7	88,7	93,4	91,5	90,1	85,7	82,1	79,9	76,2	72,7	70,3	98,0		

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	72,6	77,3	80,1	87,3	93,6	91,2	90,2	84,6	81,2	80,9	74,7	71,4	69,7	97,7

Lcpx =	97,7
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,08
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)	315																
		400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k			Total
M1 (Mic 03)	73,8	77,9	82,7	88,6	93,9		89,7	89,6	86,9	81,5	78,9	75,8	71,8	70,8			97,8
M2 (Mic 04)	72,1	76,1	78,7	87,1	93,0		91,2	90,5	86,4	85,2	83,7	77,1	75,0	72,6			97,9
Média	73,0	77,1	81,1	87,9	93,5		90,5	90,1	86,7	83,7	81,9	76,5	73,7	71,8			97,9

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	71,9	76,7	78,5	86,5	93,7	90,2	90,2	85,6	82,8	82,9	75,0	72,4	71,2	97,6

Lcpx =	97,6
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	97,99
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)	315	400	500														
	70,1	73,5	79,3	87,3	95,5	91,5	88,2	85,6	84,2	80,7	77,6	73,8	69,3	65,1	61,0	57,0	53,0
M1 (Mic 01)	70,0	73,5	80,5	87,4	92,6	87,6	87,6	82,2	80,1	75,7	72,4	70,6	67,1	63,7	60,3	57,0	53,0
M2 (Mic 02)	70,1	73,5	79,9	87,4	94,3	90,0	87,9	84,2	82,6	78,9	75,7	72,5	69,3	66,0	62,7	59,4	56,1
Média	70,1	73,5	79,9	87,4	94,3	90,0	87,9	84,2	82,6	78,9	75,7	72,5	69,3	66,0	62,7	59,4	56,1

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	-0,2	0,2	0,4	0,6
Lcpx, f	69,0	73,1	77,3	86,0	94,5	89,7	91,1	86,8	83,3	83,6	77,4	74,4	71,9	69,3	66,0	62,7	59,4

Lcpx =	98,2
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,50
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630		800		1k	1,25k		2k	2,5k	3,15k			
	71,2	75,0	79,9	86,7		91,8		90,9	90,8		82,9	80,2	76,9		4k	5k
M1 (Mic 03)																Total
M2 (Mic 04)	68,9	71,3	75,3	85,0		92,3		90,9	92,1		87,5	85,3	79,7		78,0	74,4
Média	70,2	73,5	78,2	85,9		92,1		90,9	91,5		85,8	83,5	78,5		76,2	73,2
																97,9

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	69,1	73,1	75,6	84,5	92,3	90,6	91,6	87,4	84,9	84,5	77,0	74,9	72,6	97,7

Lcpx =	97,7
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referência =	80
Ti =	25

n=1	Lcpx (L,R)	98,0
n=2	Lcpx (L,R)	98,3
	Lcpx av, 80	98,15

Lcpx =	98,03
--------	-------

CPXI	97,85
------	-------

	80 km/h	
	1	2
Pneu SRTT		
Mic 1	98,6	98,8
Mic 2	98,1	98,6
Mic 3	-	-
Mic 4	97,2	97,1

	80 km/h	
	1	2
Pneu Avon		
Mic 1	98,9	99,3
Mic 2	96,9	97,1
Mic 3	97,8	97,5
Mic 4	97,9	98,3

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	69,0	73,1	76,6	85,3	93,5	90,2	91,4	87,1	84,2	84,1	77,2	74,7	72,3
AVON n2	72,3	77,0	79,4	86,9	93,6	90,7	90,2	85,1	82,1	82,0	74,8	71,9	70,5
SRTT n1	73,1	77,7	77,2	83,2	92,3	90,6	90,7	87,4	84,3	85,9	79,0	75,4	75,8
SRTT n2	73,4	78,5	79,0	83,9	92,5	90,6	91,0	87,4	84,3	85,5	78,9	75,5	74,8
Lcpx, avon	70,9	75,5	78,2	86,2	93,6	90,4	90,8	86,2	83,3	83,2	76,2	73,5	71,5
Lcpx, sirtt	73,3	78,1	78,2	83,6	92,4	90,6	90,8	87,4	84,3	85,7	78,9	75,4	75,3

Mistura asfáltica do tipo CPA

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315																		
		400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total					
M1 (Mic 01)	77,6	81,4	86,2	85,6	91,0	88,1	85,9	83,4	80,8	76,0	71,6	69,8	64,9	95,7					
M2 (Mic 02)	75,8	78,4	82,0	83,5	89,3	88,7	85,6	83,2	79,1	75,9	70,8	68,5	64,8	94,5					
Média	76,8	80,2	84,6	84,7	90,2	88,4	85,8	83,3	80,0	76,0	71,2	69,2	64,9	95,1					

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	75,7	79,8	82,0	83,3	90,4	88,1	85,9	82,2	79,1	77,0	69,7	67,9	64,3	94,7

Lcpx =	94,7
--------	------

B poroso =	25
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	29

Lcpx =	94,85
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	75,6	79,3	82,3	85,0	91,0	87,1	84,4	82,1	79,1	74,9	70,0	67,8	63,5	94,7
M1 (Mic 03)														
M2 (Mic 04)	73,2	78,2	82,4	85,3	91,2	87,0	84,3	83,1	78,2	76,1	69,0	67,0	60,2	94,8
Média	74,6	78,8	82,4	85,2	91,1	87,1	84,4	82,6	78,7	75,5	69,5	67,4	62,2	94,7

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	73,5	78,4	79,8	83,8	91,3	86,8	84,5	81,5	77,8	76,5	68,0	66,1	61,6	94,4

Lcpx =	94,4
--------	------

B poroso =	25
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	29

Lcpx =	94,59
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	75,4	78,5	82,5	84,9	91,7	87,9	84,9	82,8	79,3	75,5	70,3	67,6	63,6	95,2
	74,4	77,8	81,9	84,3	91,6	87,8	84,8	82,6	79,9	75,5	69,9	67,9	63,7	95,0
	74,9	78,2	82,2	84,6	91,7	87,9	84,9	82,7	79,6	75,5	70,1	67,8	63,7	95,1

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	73,8	77,8	79,6	83,2	91,9	87,6	85,0	81,6	78,7	76,5	68,6	66,5	63,1	94,9

Lcpx =	94,9
--------	------

B poroso =	25
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	29

Lcpx =	95,02
--------	-------

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	76,0	80,8	86,1	88,5	92,8	87,9	87,3	83,4	80,8	78,1	73,9	73,2	71,0	96,8
	77,8	81,4	86,2	89,4	93,1	89,7	86,4	83,3	80,7	77,9	73,7	71,5	68,6	97,3
	77,0	81,1	86,2	89,0	93,0	88,9	86,9	83,4	80,8	78,0	73,8	72,4	70,0	97,0

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	75,9	80,7	83,6	87,6	93,2	88,6	87,0	82,3	79,9	79,0	72,3	71,1	69,4	96,7

Lcpx =	96,7
--------	------

B poroso =	25
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	97,01
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)	31,5	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	
	75,4	79,4	84,3	88,8	92,2	88,4	85,5	82,4	78,8	76,4	71,8	70,0	67,0	Total
M1 (Mic 03)														96,2
M2 (Mic 04)	74,3	80,1	83,2	88,0	92,3	88,0	85,6	82,9	78,0	75,0	71,0	70,3	66,0	96,0
Média	74,9	79,8	83,8	88,4	92,3	88,2	85,6	82,7	78,4	75,8	71,4	70,2	66,5	96,1

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	73,8	79,4	81,2	87,0	92,5	87,9	85,7	81,6	77,5	76,8	69,9	68,9	65,9	95,7

Lcpx =	95,8
--------	------

B poroso =	25
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	96,10
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)	315																	
	75,4	78,7	84,7	88,1	92,6	97,7	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k					Total
M1 (Mic 01)																		96,5
M2 (Mic 02)	77,6	78,1	81,7	86,0	91,6	91,5	87,9	84,4	83,0	79,0	75,2	72,1	69,2					96,8
Média	76,6	78,4	83,5	87,2	92,1	90,0	87,6	84,0	82,0	78,7	74,6	72,1	70,1					96,6

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6					Total
Lcpx, f	75,5	78,0	80,9	85,8	92,3	89,7	87,7	82,9	81,1	79,7	73,1	70,8	69,5					96,3

Lcpx =	96,3
--------	------

B poroso =	25
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	96,67
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630													
	76,6	77,6	80,3	84,4	90,6	1k				1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k		Total
M1 (Mic 03)	76,6	77,6	80,3	84,4	90,6	90,7				88,0	84,0	78,3	74,4	71,5	68,2		96,0
M2 (Mic 04)	75,9	77,7	80,4	84,7	90,9	90,2				88,2	84,2	78,6	74,6	71,5	68,5		96,0
Média	76,3	77,7	80,4	84,6	90,8	90,5				88,1	84,1	78,5	74,5	71,5	68,4		96,0

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	75,2	77,3	77,8	83,2	91,0	90,2	88,2	83,0	81,2	79,5	73,0	70,2	67,8	95,7

Lcp _x =	95,7
--------------------	------

B poroso =	25
CT =	0,03
Velocidade med =	77
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcp _x =	96,09
--------------------	-------

n=1	Lcp _x (L,R)	96,6
n=2	Lcp _x (L,R)	96,4
	Lcp_x av, 80	96,47

CPXI	95,61
------	--------------

	80 km/h	
	265	270
Pneu SRTT	95,7	95,2
Mic 1	94,5	95,0
Mic 2	94,7	94,6
Mic 3	94,8	94,5

	80 km/h	
	265	270
Pneu Avon	96,8	96,5
Mic 1	97,3	96,8
Mic 2	96,2	96,0
Mic 3	96,0	96,0

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	76,5	78,0	82,2	86,1	91,5	90,2	87,8	84,0	82,0	78,6	74,6	71,8	69,3
AVON n2	76,1	80,5	85,1	88,7	92,6	88,6	86,3	83,0	79,7	77,0	72,8	71,4	68,6
SRTT n1	74,7	79,1	81,0	83,5	90,9	87,5	85,2	81,9	78,5	76,8	69,0	67,1	63,1
SRTT n2	73,8	77,2	81,3	83,6	91,4	87,8	84,8	82,6	79,5	74,9	69,9	67,4	63,6
Lcpx, avon	76,3	79,4	83,9	87,6	92,1	89,5	87,1	83,6	81,0	77,9	73,8	71,6	69,0
Lcpx, srtt	74,3	78,3	81,2	83,5	91,2	87,6	85,0	82,3	79,1	75,9	69,5	67,3	63,4

Pavimento Rígido (Túnel Antonieta de Barros)

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	75,1	79,7	83,6	86,6	94,9	90,5	92,0	91,2	89,8	85,1	82,0	79,3	75,0	99,8
M1 (Mic 01)														
M2 (Mic 02)	75,0	79,3	79,4	83,8	94,8	91,2	89,9	89,4	86,6	84,7	84,5	79,1	77,4	98,9
Média	75,1	79,5	82,0	85,4	94,9	90,9	91,1	90,4	88,5	84,9	83,4	79,2	76,4	99,4

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	74,0	79,1	79,4	84,0	95,1	90,6	91,2	89,3	87,6	85,9	81,9	77,9	75,8	99,1

Lcpx =	99,1
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	99,12
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)	315																		
	71,0	75,2	77,0	83,1	91,0	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total					
M1 (Mic 03)																			
M2 (Mic 04)	70,9	75,6	77,3	82,6	91,6	91,9	92,0	89,8	87,3	86,5	85,0	79,6	77,6	98,6					
Média	71,0	75,4	77,2	82,9	91,3	91,9	92,5	89,9	87,2	86,7	85,0	79,5	77,3	98,7					

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	69,9	75,0	74,6	81,5	91,5	91,6	92,6	88,8	86,3	87,7	83,5	78,2	76,7	98,4

Lcpx =	98,4
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	98,43
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)	315																		
	76,7	81,9	84,1	88,4	95,0	91,4	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k				Total	
M1 (Mic 01)																		100,3	
M2 (Mic 02)	74,5	79,7	82,3	86,0	94,0	91,8		91,1	90,6	87,3	86,3	82,3	79,9	79,4				99,3	
Média	75,7	80,9	83,3	87,4	94,5	91,6		92,0	91,1	89,3	86,2	81,8	79,8	78,0				99,8	

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	74,6	80,5	80,7	86,0	94,7	91,3	92,1	90,0	88,4	87,2	80,3	78,5	77,4	99,6

Lcpx =	99,6
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med	80
=	
Vel. Referencia =	80
Ti =	20,0

Lcpx =	99,56
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	74,0	78,6	79,4	83,9	92,1		91,9	92,5	90,1	87,6	85,9	83,4	78,2	77,5	98,9
	74,8	78,1	79,7	84,0	92,2		92,2	92,9	90,1	87,0	85,9	83,1	78,5	78,5	99,0
	74,4	78,4	79,6	84,0	92,2		92,1	92,7	90,1	87,3	85,9	83,3	78,4	78,0	98,9
Média															

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	73,3	78,0	77,0	82,6	92,4	91,8	92,8	89,0	86,4	86,9	81,8	77,1	77,4	98,7

Lcpx =	98,8
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	20

Lcpx =	98,70
--------	-------

n=1	Lcpx (L,R)	98,7
n=2	Lcpx (L,R)	99,2
	Lcpx srтт, 80	98,95

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)	315																
	400																
	500																
	630																
M1 (Mic 01)	800																
	1k																
M2 (Mic 02)	1,25k																
	1,6k																
Média	2k																
	2,5k																
	3,15k																
	4k																
	5k																
	Total																

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	74,1	78,6	80,1	88,4	96,0	89,4	92,3	88,6	85,5	85,5	79,4	75,9	75,0	99,5

Lcpx =	99,5
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referência =	80
Ti =	25

Lcpx =	99,40
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)																			
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k						
	75,2	78,4	82,5	89,7	94,0	91,6	93,5	91,5	87,9	86,4	82,3	78,1	77,5	100,1					
	73,9	76,5	83,5	89,8	93,2	89,9	92,4	89,9	85,0	82,5	78,1	75,1	72,8	98,8					
	74,6	77,6	83,0	89,8	93,6	90,8	93,0	90,8	86,7	84,9	80,7	76,9	75,8	99,5					

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	73,5	77,2	80,4	88,4	93,8	90,5	93,1	89,7	85,8	85,9	79,2	75,6	75,2	99,2

Lcpx =	99,2
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	99,03
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	M1 (Mic 03)	74,0	78,8	84,7	90,3	94,3	90,3	92,8	90,2	85,7	83,5	79,5	75,2	74,3	99,5
	M2 (Mic 04)	71,5	75,4	78,8	87,1	92,7	90,7	91,5	91,6	86,3	87,1	83,5	77,4	74,7	98,9
	Média	72,9	77,4	82,7	89,0	93,6	90,5	92,2	91,0	86,0	85,7	81,9	76,4	74,5	99,2

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	71,8	77,0	80,1	87,6	93,8	90,2	92,3	89,9	85,1	86,7	80,4	75,1	73,9	98,9

Lcpx =	98,9
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	80
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

n=1	Lcpx (L,R)	99,0
n=2	Lcpx (L,R)	98,9
	Lcpx av, 80	98,97

Lcpx =	98,77
--------	-------

CPXI	98,96
------	--------------

	80 km/h	
	1	2
Pneu SRTT		
Mic 1	99,8	100,3
Mic 2	98,9	99,3
Mic 3	98,7	98,9
Mic 4	98,6	99,0

	80 km/h	
	1	2
Pneu Avon		
Mic 1	100,2	100,1
Mic 2	99,3	98,8
Mic 3	99,2	99,5
Mic 4	99,0	98,9

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	72,7	77,1	80,3	88,0	93,8	90,4	92,7	89,8	85,5	86,3	79,9	75,4	74,6
AVON n2	75,5	80,2	81,0	87,8	94,8	89,6	92,6	89,2	85,2	86,0	79,5	75,5	74,4
SRTT n1	72,4	77,5	77,6	82,9	93,6	91,1	91,9	89,0	87,0	86,9	82,8	78,0	76,3
SRTT n2	74,0	79,4	79,2	84,6	93,7	91,5	92,5	89,5	87,5	87,0	81,1	77,8	77,4
LcpX, avon	74,4	78,9	80,7	87,9	94,3	90,0	92,6	89,5	85,4	86,1	79,7	75,4	74,5
LcpX, srtt	73,3	78,6	78,5	83,8	93,7	91,3	92,2	89,3	87,2	87,0	82,0	77,9	76,9

Pavimento Rígido (Túnel do Morro Agudo) Microfresado

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315																
		400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k				Total
M1 (Mic 01)	76,5	81,3	81,7	86,0	93,9	91,0	90,2	89,5	86,8	83,6	78,3	75,9	74,0				98,6
M2 (Mic 02)	76,4	81,3	81,2	82,8	94,3	93,9	91,6	90,8	86,8	85,2	81,5	78,4	78,1				99,7
Média	76,5	81,3	81,5	84,7	94,1	92,7	91,0	90,2	86,8	84,5	80,2	77,3	76,5				99,2

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6				Total
Lcpx, f	75,4	80,9	78,9	83,3	94,3	92,4	91,1	89,1	85,9	85,5	78,7	76,0	75,9				99,0

Lcpx =	99,0
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,17
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	78,0	82,5	84,3	88,0	95,5	92,3	90,2	88,5	86,2	83,7	78,3	74,9	73,9	99,5
	76,5	80,8	80,5	85,5	94,4	95,0	91,6	89,1	87,8	86,2	82,7	80,4	77,5	100,1
	77,3	81,7	82,8	86,9	95,0	93,9	91,0	88,8	87,1	85,1	81,0	78,5	76,1	99,8

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	76,2	81,3	80,2	85,5	95,2	93,6	91,1	87,7	86,2	86,1	79,5	77,2	75,5	99,6

Lcpx =	99,6
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,79
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)																				
	315	400	500	630	800		1k	1,25k												
	79,2	84,3	86,1	89,0	95,7		93,2	90,0												Total
	78,4	82,4	83,4	87,9	95,1		95,9	92,0												99,9
	78,8	83,5	85,0	88,5	95,4		94,8	91,1												100,6
Média																				100,3

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	77,7	83,1	82,4	87,1	95,6	94,5	91,2	87,1	85,6	85,0	78,0	76,1	74,2	100,0

Lcpx =	100,0
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	2,5

Lcpx =	99,22
--------	-------

n=1	Lcpx (L,R)	98,5
n=2	Lcpx (L,R)	98,8
	Lcpx srftt, 80	98,65

80 km/h, w=L, n=1 (AVON)																	
	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k			
M1 (Mic 01)	76,7	80,1	84,4	88,9	95,9		90,0	90,5	89,0	83,0	81,8	77,9	73,6	72,2		Total	99,3
M2 (Mic 02)	74,5	78,0	82,5	86,6	96,3		93,2	91,6	89,0	86,1	84,5	81,2	76,4	74,5			100,1
Média	75,7	79,2	83,6	87,9	96,1		91,9	91,1	89,0	84,8	83,4	79,9	75,2	73,5			99,7

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lepx, f	74,6	78,8	81,0	86,5	96,3	91,6	91,2	87,9	83,9	84,4	78,4	73,9	72,9	99,5

Lepx =	99,5
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lepx =	98,82
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)																	
	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k			
M1 (Mic 03)	77,5	81,7	87,1	90,6	95,8		90,7	91,4	90,1	84,3	82,5	79,3	73,8	72,8		Total	99,9
M2 (Mic 04)	74,2	78,7	82,0	87,3	94,7		94,3	92,3	90,8	88,7	86,1	80,8	78,0	74,9		100,3	
Média	76,2	80,5	85,3	89,3	95,3		92,9	91,9	90,5	87,0	84,7	80,1	76,4	74,0		100,1	

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lepx, f	75,1	80,1	82,7	87,9	95,5	92,6	92,0	89,4	86,1	85,7	78,6	75,1	73,4	99,8

Lepx =	99,8
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lepx =	99,13
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)																			
	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k						
	74,5	78,7	83,2	89,4	95,5	90,0	91,3	89,9	83,7	82,0	78,0	75,0	72,1						Total
	72,4	76,8	81,4	87,2	96,4	92,7	92,1	89,4	87,1	85,4	81,8	76,6	74,4						99,3
	73,6	77,9	82,4	88,4	96,0	91,6	91,7	89,7	85,7	84,0	80,3	75,9	73,4						100,2
Média																			99,8

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6						Total
Lcpx, f	72,5	77,5	79,8	87,0	96,2	91,3	91,8	88,6	84,8	85,0	78,8	74,6	72,8						99,6

Lcpx =	99,6
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	98,91
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800		1k	1,25k									
	78,1	82,6	86,8	90,9	95,2		90,8	91,5	89,2	84,5	81,8	2,5k	3,15k	4k	5k		Total
M1 (Mic 03)																	
M2 (Mic 04)	74,9	78,7	81,9	87,8	94,2		93,3	92,4	89,6	88,8	85,8		80,8	77,6	74,9	99,8	
Média	76,8	81,1	85,0	89,6	94,7		92,2	92,0	89,4	87,2	84,2		79,8	76,0	73,9	99,8	

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	75,7	80,7	82,4	88,2	94,9	91,9	92,1	88,3	86,3	85,2	78,3	74,7	73,3	99,5

Lcpx =	99,5
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

n=1	Lcpx (L,R)	99,0
n=2	Lcpx (L,R)	98,8
	Lcpx av, 80	98,91

Lcpx =	98,76
--------	-------

CPXI	98,78
------	-------

	80 km/h	
	1	2
Pneu SRTT		
Mic 1	98,6	98,7
Mic 2	99,7	100,1
Mic 3	99,5	99,9
Mic 4	100,1	100,6

	80 km/h	
	1	2
Pneu Avon		
Mic 1	99,3	99,3
Mic 2	100,1	100,2
Mic 3	99,9	99,7
Mic 4	100,3	99,8

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	74,4	79,4	81,3	87,7	95,6	91,6	91,9	88,4	85,6	85,1	78,5	74,6	73,1
AVON n2	74,9	79,5	81,9	87,2	95,9	92,1	91,6	88,7	85,2	85,1	78,5	74,5	73,1
SRTT n1	75,8	81,1	79,6	84,6	94,8	93,0	91,1	88,5	86,0	85,8	79,1	76,6	75,7
SRTT n2	77,3	82,3	81,6	86,1	95,4	93,9	91,0	87,1	85,2	84,6	77,6	75,4	74,0
Lcp _x , avon	74,6	79,4	81,6	87,5	95,8	91,9	91,8	88,6	85,4	85,1	78,5	74,6	73,1
Lcp _x , srtt	76,6	81,8	80,7	85,4	95,1	93,5	91,0	87,8	85,6	85,2	78,4	76,1	74,9

Pavimento Rígido (Túnel do Morro Agudo) Acostamento

80 km/h, w=L, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	81,1	85,6	85,7	87,7	94,4	90,6	91,8	90,7	87,7	83,3	78,7	76,6	74,7	99,5
M1 (Mic 01)	78,6	83,6	84,5	85,7	95,7	94,1	91,9	90,5	87,6	84,9	80,2	77,2	75,4	100,4
M2 (Mic 02)	80,0	84,7	85,1	86,8	95,1	92,7	91,9	90,6	87,7	84,2	79,5	76,9	75,1	100,0
Média														

Cdf	-1,1	-0,4	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	78,9	84,3	82,5	95,3	92,4	92,0	89,5	86,8	85,2	78,0	75,6	74,5	99,7

Lcpx =	99,7
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referência =	80
Ti =	25

Lcpx =	98,94
--------	-------

80 km/h, w=R, n=1 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	79,0	84,2	86,5	87,3	96,0	91,2	92,5	91,3	88,9	84,9	78,6	75,8	73,8	100,4
	78,4	83,7	82,7	85,6	94,9	94,9	92,6	91,4	89,5	86,6	82,5	79,4	77,2	100,8
	78,7	84,0	85,0	86,5	95,5	93,4	92,6	91,4	89,2	85,8	81,0	78,0	75,8	100,6

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	77,6	83,6	82,4	85,1	95,7	93,1	92,7	90,3	88,3	86,8	79,5	76,7	75,2	100,3

Lcpx =	100,3
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcpx =	99,54
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	80,2	84,4	86,9	89,1	95,0	93,2	91,9	87,9	87,1	83,9	79,3	76,7	74,9	100,0
	77,9	81,9	83,7	87,4	95,2	95,2	93,5	90,8	87,5	85,3	81,7	78,4	77,2	100,9
	79,2	83,3	85,6	88,3	95,1	94,3	92,8	89,6	87,3	84,7	80,7	77,6	76,2	100,5

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	78,1	82,9	83,0	86,9	95,3	94,0	92,9	88,5	86,4	85,7	79,2	76,3	75,6	100,2

Lcpx =	100,2
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	25,0

Lcpx =	99,42
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (SRTT)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	80,0	84,1	86,8	89,5	96,0	93,5	92,2	89,6	87,7	84,6	79,0	76,4	75,4	100,6
	78,3	82,0	82,7	86,9	95,8	96,5	93,2	89,7	88,4	86,2	82,4	79,7	77,7	101,3
	79,2	83,2	85,2	88,4	95,9	95,3	92,7	89,7	88,1	85,5	81,0	78,4	76,7	101,0

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcp _x , f	78,1	82,8	82,6	87,0	96,1	95,0	92,8	88,6	87,2	86,5	79,5	77,1	76,1	100,8

Lcp _x =	100,8
--------------------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	25

Lcp _x =	99,98
--------------------	-------

n=1	Lcp _x (L,R)	99,2
n=2	Lcp _x (L,R)	99,7
	Lcp _x sr _{tt} , 80	99,47

80 km/h, w=R, n=1 (AVON)	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	78,1	82,4	86,3	90,8	94,9		91,1	94,8	91,4	86,4	83,8	80,0	76,4	74,7	100,6
	74,5	79,6	81,6	88,2	94,1		92,9	94,7	92,1	90,0	87,4	82,1	79,1	77,3	100,7
	76,7	81,2	84,6	89,7	94,5		92,1	94,8	91,8	88,6	86,0	81,2	78,0	76,2	100,7

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	75,6	80,8	82,0	88,3	94,7	91,8	94,9	90,7	87,7	87,0	79,7	76,7	75,6	100,4

Lcpx =	100,4
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	99,69
--------	-------

80 km/h, w=L, n=2 (AVON)																	
	315	400	500	630	800		1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total		
	77,3	81,4	85,2	90,8	94,9		90,5	92,7	90,4	84,7	82,3	79,0	74,8	73,3	99,8		
	76,9	80,5	83,3	88,9	96,6		94,3	93,3	90,1	87,7	85,5	81,0	76,4	75,3	101,0		
Média	77,1	81,0	84,4	90,0	95,8		92,8	93,0	90,3	86,5	84,2	80,1	75,7	74,4	100,5		

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2		-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	76,0	80,6	81,8	88,6	96,0		92,5	93,1	89,2	85,6	85,2	78,6	74,4	73,8	100,2

Lcpx =	100,2
--------	-------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

Lcpx =	99,51
--------	-------

80 km/h, w=R, n=2 (AVON)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	Total
	78,0	82,2	86,6	90,9	94,8	90,5	93,9	90,7	85,6	82,6	78,7	74,8	73,1	100,2
	75,4	79,1	81,3	88,5	94,3	92,1	93,6	91,7	88,7	85,8	81,1	78,0	75,9	100,2
	76,9	80,9	84,7	89,9	94,6	91,4	93,8	91,2	87,4	84,5	80,1	76,7	74,7	100,2

Cdf	-1,1	-0,4	-2,6	-1,4	0,2	-0,3	0,1	-1,1	-0,9	1	-1,5	-1,3	-0,6	Total
Lcpx, f	75,8	80,5	82,1	88,5	94,8	91,1	93,9	90,1	86,5	85,5	78,6	75,4	74,1	99,9

Lcpx =	99,9
--------	------

B =	30
CT =	0,03
Velocidade med =	84
Vel. Referencia =	80
Ti =	22

n=1	Lcpx (L,R)	99,8
n=2	Lcpx (L,R)	99,3
	Lcpx av, 80	99,55

Lcpx =	99,16
--------	-------

CPXI	99,51
------	--------------

	80 km/h	
	1	2
Pneu SRTT		
Mic 1	99,5	100,0
Mic 2	100,4	100,9
Mic 3	100,4	100,6
Mic 4	100,8	101,3

	80 km/h	
	1	2
Pneu Avon		
Mic 1	100,2	99,8
Mic 2	101,3	101,0
Mic 3	100,6	100,2
Mic 4	100,7	100,2

Frequência (Hz)	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
AVON n1	75,9	80,5	81,9	88,5	95,4	91,8	93,5	89,7	86,1	85,3	78,6	74,9	74,0
AVON n2	76,5	81,0	82,4	88,5	95,1	92,1	94,8	90,3	87,2	86,5	79,5	76,0	74,9
SRTT n1	78,3	84,0	82,5	85,3	95,5	92,8	92,3	89,9	87,6	86,1	78,8	76,2	74,9
SRTT n2	78,1	82,9	82,8	87,0	95,7	94,5	92,9	88,5	86,8	86,1	79,3	76,7	75,9
Lcpx, avon	76,2	80,8	82,2	88,5	95,3	92,0	94,2	90,0	86,6	85,9	79,1	75,5	74,5
Lcpx, srtt	78,2	83,4	82,6	86,2	95,6	93,7	92,6	89,3	87,2	86,1	79,1	76,4	75,4